

からだ と 元 素

田 中 俊 行

Toshiyuki TANAKA

Human body and elements

私たちのからだの中には、すべて合わせてもわずか10 g 程度しかない微量元素^{1~3)}と呼ばれる元素群がある。ここで、からだの中の微量元素の栄養学的必須性と機能を中心に概説する。

この総説の概要については、平成4年度鳥取大学医療技術短期大学部公開講座“健康と社会(2)”において1992年8月29日に講演した。

1. からだの構成元素

自然界には、元来最も軽い第1番元素の水素(H)から最も重い第92番元素のウラン(U)まで91種の元素が存在する。第43番元素のテクネチウム(Tc)などの人工的に造った元素もふくめると107種の元素が公に認められている。

私たちのからだを構成する元素のうちで、最も多いのが酸素(O)であり、からだの全重量の61%を占めている。次いで、炭素(C)が23%と多く、Hの10%、窒素(N)の2.6%と続く。これらO, C, H, Nの4元素は主要元素(major elements)と呼ばれ、からだの水分や糖分、脂肪分、タンパク質の成分であり、全部あわせるとからだの約96.6%を占めている。次いで、からだの中に多いグループを準主要元素(macro elements)と呼び、ナトリウム(Na)、カリウム(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)、リン(P)、硫黄(S)、塩素(Cl)の7元素であり、骨や体液の成分として存在している。これら7元素を全部あわせるとからだの約3.4%になる。主要、準主要元素の11元素でほぼ100%になる。従って、自然界の91種の元素のうちわずか11元素でからだのほとんどが出来上がっているというのは、驚くべきことと言う

化学研究室

しかない。しかしながら、これら11元素以外の元素も僅かながらからだの中には存在しており、それらを総称して微量元素(trace elements)と呼んでいる。微量元素の中で最も多い鉄(Fe)でも、その存在量は0.006%にすぎない。微量元素を全部あわせてもからだの約0.02%にしかならない^{3,4)}(図1)。

2. 必須元素と有害元素

栄養の立場から元素をみると、ある元素が人間あるいは動物の成長、発育、生理的機能(からだのバランス)の維持に食物中に不可欠であるとき、その元素を必須元素(essential elements)と呼ぶ。そうでない元素を非必須元素(non-essential elements)あるいは有害元素(toxic elements)と呼んでいる。

主要、準主要元素の11元素は勿論必須元素であり、微量元素の中にも現在までに人間ではクロム(Cr)、マンガン(Mn)、Fe、コバルト(Co)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)、セレン(Se)、モリブデン(Mo)、ヨウ素(I)の9種、哺乳動物ではそれらに加えてフッ素(F)、珪素(Si)、バナジウム(V)、ニッケル(Ni)、ヒ素(As)、スズ(Sn)、鉛(Pb)の7種(合わせて16種)の元素が必須元素であることが証明されてきている。それらの元素を必須微量元素(essential trace elements)と呼んでいる。以前は有害元素とされていたCr, Seは、今日では必須微量元素であり、典型的有害元素のAs, Pbも哺乳動物の飼料に極微量は含有される必要性があると言われるようになってきている(図1)。

石沢⁴⁾は、ある元素が必須元素であるための判定

	1 (1A)	2 (2A)	3 (3A)	4 (4A)	5 (5A)	6 (6A)	7 (7A)	8 (8)	9 (8)	10 (8)	11 (1B)	12 (2B)	13 (3B)	14 (4B)	15 (5B)	16 (6B)	17 (7B)	18 (0)
1	H 1																	He
2	Li	Be											B	C 12	N 14	O 16	F 19	Ne
3	Na 23	Mg 24											Al	Si 28	P 31	S 32	Cl 35.5	Ar
4	K 39	Ca 40	Sc	Ti	V 51	Cr 52	Mn 55	Fe 56	Co 59	Ni 58	Cu 63.5	Zn 65	Ga	Ge	As 75	Se 79	Br 80	Kr
5	Rb 85.5	Sr 87.6	Y	Zr	Nb 93	Mo 96	Tc 98	Ru 101	Rh 103	Pd 106	Ag 108	Cd 112.4	In	Sn 118.7	Sb 121.8	Te 127.6	I 126.9	Xe
6	Cs 132.9	Ba 137.3	La 138.9	Hf	Ta 181	W 184	Re 187	Os 190	Ir 192	Pt 195	Au 197	Hg 200.6	Tl	Pb 207.2	Bi 209	Po 209	At 210	Rn
7	Fr 223	Ra 226	Ac 227	Unq	Unp	Unh	Uns	元素記号の下の数字は、からだの中のその元素の重量百分率 (%)										

* ランタノイド Ce-Lu ** アクチノイド Th-Lr

図 1. 周期表からみたからだの構成元素

条件として次の5条件を挙げている。

- ①あらゆる生物の健康組織に存在する。
- ②動物が違ってても、濃度は一定である。
- ③食餌に欠損した時、欠乏症を呈する。欠乏症に添加すれば、回復する。
- ④正規分布：臓器、組織中の含有量分布が正規分布に近い。
- ⑤胎児、新生児に含有されている。

このうち、最も重要なのは第3番目の条件で、ある元素が必須元素であることの決め手になる条件である。

哺乳動物で As が必須元素の仲間入りをした訳は、動物実験で As の欠乏症が発見されたということである。As 欠乏症状として、ラットでは成長の遅れ、すい臓の肥大と Fe の沈着、ヤギでは繁殖に関して次世代の成長の遅れと死亡率の上昇が観察されている。ヤギで飼料中の必要量は 100 ppb (ppb は parts per billion の省略形で十億分率のこと) と推定されている⁵⁾。

必須元素と有害元素の違いは、前者が欠乏症と過剰症の両方が知られているのに対して後者は過剰症しか知られていないことにある。図2は、からだの反応と元素の摂取量との関係を表したものである。実線は必須元素についての挙動で、ある適正な摂取量の濃度範囲では、からだの反応は平坦な正常なところで維持され健康ということになる。その濃度範囲

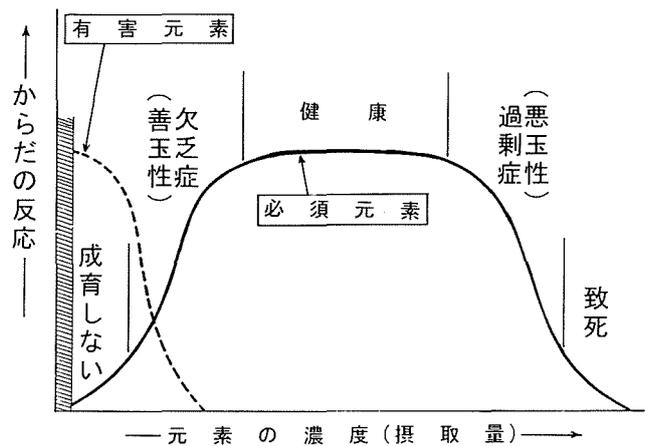


図 2. からだの反応と元素の濃度の関係

以下になると、欠乏症が出現し、更に低濃度になると成長せずに死亡してしまう。この部分は栄養学で扱う領域で「この元素をとらないと、病気になるのでよく摂取するように。」と言われることになる。すなわち、この元素がからだにとって善玉であるという見方である。一方その濃度範囲以上になると、過剰症が出現し、さらに高濃度摂取すると中毒死する。この部分は中毒学の扱う領域で「この元素をとりすぎると病気になるので摂取しないように。」と言われることになる。すなわち、その元素がからだにとって悪玉という見方である。従って、必須元素は不足してもいけないし、多すぎてもいけない、善悪両性を持っている元素ということができる。一方、

有害元素は、図の点線で示したように悪玉性しか知られていない元素といえることができる。図の左端の斜線部分は、現在の分布・精製技術をもってしてもこの濃度以下の欠乏食を作ることができない部分で、斜線を引いて隠れて見えないことを表している。過去において、技術の進歩によってこの斜線部分の幅がどんどん狭められてきた。その過程で、有害元素と言われていた物の善玉性（欠乏症）の部分が見えるようになり、As, Pbも有害元素から必須元素と言われるようになってきたということである。将来、斜線部分の幅が更に狭められたら、現在有害元素と言われているものも必須元素の仲間入りをし、最後にはすべての元素が必須元素になるのではないかという気がしている。

3. 必須微量元素の代表 — 亜鉛 —

ヒトにおける必須微量元素の欠乏症と過剰症を表1にまとめた。欠乏症について見てみると、Feが欠乏すると貧血（周知のこと）、Znが不足すると成長・発育の遅れがみられ、中近東の方では身長が伸びないいわゆる小人症が観察されている。Cuの欠乏も貧血との関係が深い。Crが欠乏すると耐糖能の低下が起こり、それにある種のCr化合物を添加すると、一部の糖尿病の改善に有効であると言われている。CoはビタミンB₁₂の構成要素であり、Se欠乏症としては、中国北東部のKeshan地区で流行した風土性心筋症が有名である。Iが不足すると甲状腺腫となり、全世界には億単位でI欠乏症の人が存在するとさえ言われている。過剰症について見ると、過剰症は主に職業的暴露で出現したもので、Zn・ヒューム熱はZnOの蒸気を吸入する事によって起こるインフルエンザ様症状であり、鼻中隔

表1 必須微量元素の欠乏症と過剰症（ヒト）

元 素	欠 乏 症	過 剰 症
鉄 (Fe)	貧 血	血色素症
亜 鉛(Zn)	成長・発育の遅延(小人症)	亜鉛ヒューム熱
銅 (Cu)	貧血, 低たんぱく血症	溶血, 下痢
クロム(Cr)	耐糖能の低下(糖尿病)	鼻中隔穿孔, 肺がん
コバルト(Co)	悪性貧血(ビタミンB ₁₂ 欠乏)	—
セレン(Se)	風土性心筋症(克山病)	爪床炎, 金属的味覚
ヨウ素(I)	甲状腺腫	—

穿孔, 肺癌は6価Cr化合物の吸入・暴露によっておこる。

これらの必須微量元素の中でも栄養学的にもっとも大切と考えられているのは、Znである。からだとZnの関係について現在までにわかっていることを表2にまとめた。Znは、成人のからだの中に約2g存在し、微量元素のうちではFeについてからだのなかに多い元素である。Znはからだのいたるところに存在しており、からだ全体の約9割は筋肉と骨の中にあり⁶⁾、次いで皮膚、肝臓に多いとされている。皮膚組織中のZn含有量は、山口⁷⁾が乾燥重量当たりの値(10人, 平均 ± S.D.)を表皮で59.6 ± 26.1 ppm, 真皮で9.8 ± 4.1 ppmと報告している。またZnが高濃度含有されている組織としては、前立腺, 精囊, 眼球の脈絡膜があり、新陳代謝や細胞分裂の盛んなところに多いと言える。

表2 からだと亜鉛 (Zn)

体内総量(成人)	1.5 ~ 2.5 g
体内分布	筋肉と骨(約90%), 皮膚, 肝臓に多い 前立腺, 精囊, 眼球の脈絡膜で高濃度
機 能	スーパーオキシドディスムターゼほか多数の酵素の構成成分 細胞分裂, 核酸代謝, 蛋白質合成, ホルモン分泌
欠乏症の症状	成長の遅延, 性器発育不全, 生殖機能減退, 味覚障害, 食欲不振, 皮膚炎(腸性肢端皮膚炎), 創傷治癒力の低下
欠乏症の検査指標	血清亜鉛の低下, 赤血球亜鉛の低下, 毛髪亜鉛の低下, 尿中亜鉛の低下, 血清アルカリフォスファターゼ活性の低下
1日必要摂取量	成人: 10 mg (0.01 g) 程度 乳 児: 人工調整乳の亜鉛濃度を 2 mg/l ~ 6 mg/l

近年、分子レベルの研究でZnが特殊な繰り返し構造を持つ転写制御蛋白質と結合し、“zinc finger”を形成してDNAの転写を活性化することが明らかにされてきた⁸⁾。これらのことからZnが生命現象の根本の遺伝子、細胞分裂に強く関わっていることが示唆される。また、Znが欠乏すると、成長の遅れ、性器の発育不全、生殖機能の減退、味覚異常からくる食欲不振、皮膚炎、傷が治りにくいなどの症状が現れる事実がある。以上、Znが微視的には細胞分裂に強く関わり、巨視的には成長・発育に強く関係している点が注目される。このことは、ヒトの一生でもっとも成長・発育の盛んな胎児・乳幼児・小児期にZn栄養を特に重視しなければなら

ないことを示唆している。Fig. 3 は、母乳中の Zn ほか Ca, Mg, Cu, Fe の含有量に注目し、採取した母乳サンプル222例のうち設定した産後時期からはずれるもの、血液の混入が認められるものを除いた179例の母乳の産後時期別 Ca, Mg, Zn, Cu, Fe 含有量⁹⁾をまとめたものである。Ca は、産後すぐに少し低いが、平均で260~290 $\mu\text{g}/\text{ml}$ とほぼ一定のレベルを保っている。Mg は、産後すぐにすこし高いが、30 $\mu\text{g}/\text{ml}$ のほぼ一定のレベルを保っている。Fe と Cu は、産後10日以内で平均が0.5 $\mu\text{g}/\text{ml}$ であるが、産後経過と共に徐々に減少して産後4か月で平均が0.2 $\mu\text{g}/\text{ml}$ になっている。それに比べて、Zn の体内量は Fe の約半分であるが、産後すぐから4か月までの母乳中 Zn の平均レベルは1~10 $\mu\text{g}/\text{ml}$ の範囲にあり、Fe に較べて1桁高い値を示している。これは乳児の栄養に Zn が重要であることを示唆している。

Fig. 4 は、母乳中の Zn 含有量の個人別の推移を

示したものである。図中の直線で結んだプロットは同一人から採取した母乳の分析値を表している。個人的にも Zn は初乳に特に高く、産後経過と共に急激に減少する傾向があることがわかる。これは産後すぐの時期に、乳児にとって Zn は特に大切であることを示す。個人的にみると、矢印1で示すように高い Zn レベルを推移している人もあり、矢印2で示すようにその半分以下の低い Zn レベルを推移している人もある。Zn 欠乏症の大きな特徴は成長・発育の遅延であることを考えると、矢印2のような低 Zn 含有量の母乳を供給する母親に対する Zn 栄養の指導が特に大切であることを強調できる。

Fig. 3 から分かるように、調査した産後期間で変動係数が最も大きかったのは Zn であり、母乳中 Zn は個人差が大きいことがわかる。それ故に、公衆衛生学的見地から母乳中の Zn 含有量を調査することは有意義であると考えられる。Fig. 5 ~ Fig. 8 までに、個人別の母乳中 Ca, Mg, Fe, Cu 含有量の推移を示した。Table 3 は、これらのデータを用いて母乳栄養児の1日 Ca, Mg, Fe, Cu, Zn 摂取量を推定したものである。その数値は産後各時期の母乳中含有量の平均値にその時期の哺乳量を掛け合わせて算定したものである。母乳のみから Zn を摂取すると考えると、Zn の1日推定摂取量は産後4か月の間、だいたい1~2 mg と言える。母乳のみからくる Fe の1日推定摂取量は、Zn に比べて1桁小さい0.2~0.3 mg (初乳の場合を除く)である。

母乳の Ca, Mg, Fe, Cu, Zn 含有量と比較するために、母乳分析当時(1980年)の市販育児用粉乳の分析も行った²⁾。Table 4 は、その分析結果をまとめたものである。数値は、粉乳末を14%に薄めた常用のミルク(蒸留水で希釈)についての値を示す。Zn は、0.81~1.74 $\mu\text{g}/\text{ml}$ と、母乳の分析値の1~10 $\mu\text{g}/\text{ml}$ に比べて低い値となっている。Cu は、0.020~0.056 $\mu\text{g}/\text{ml}$ と、母乳での0.2~0.5 $\mu\text{g}/\text{ml}$ に比べておよそ10分の1の低い値である。Fe は7.6~10.4 $\mu\text{g}/\text{ml}$ と母乳に比べてはるかに高い値である。Fe の栄養素としての重要性はずっと以前からよく知られていることであり、粉乳には既に添加されていた訳である。母乳と粉乳のミネラル分析の結果や Zn, Cu 欠乏症に対する治療の臨床的所見のデータから、1983年、育児用粉乳に Zn, Cu の添加が許可され、現在は Zn, Cu が添加され、母乳に近い含有量に

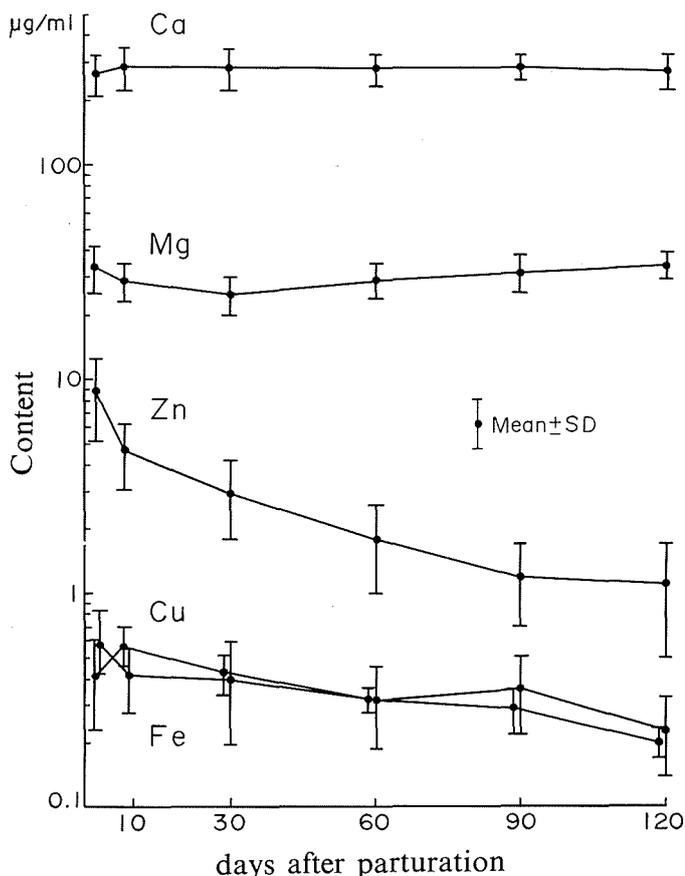


Fig. 3. Calcium, magnesium, iron, copper and zinc contents of human milk. Number of samples which were used is 179.

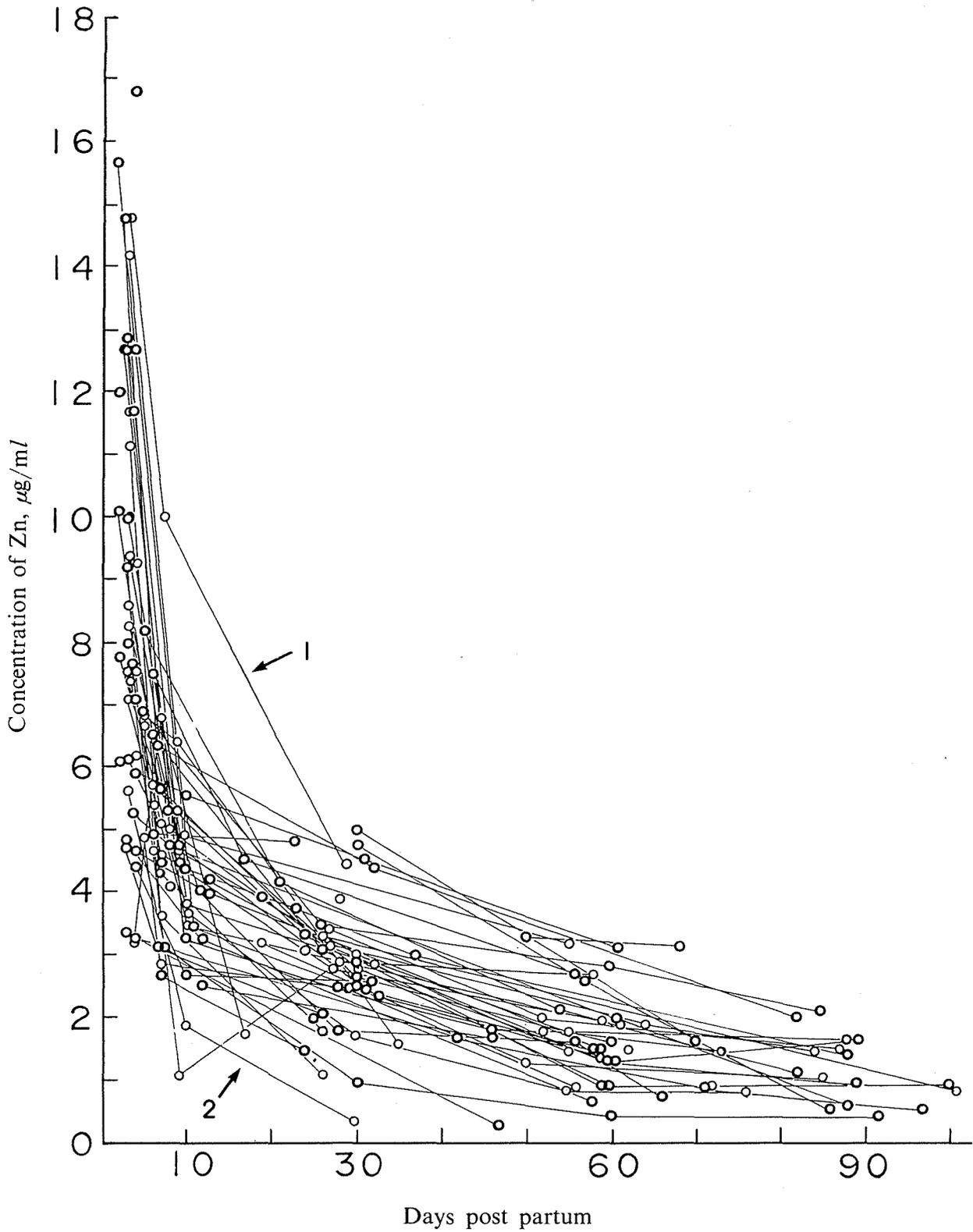


Fig. 4. Longitudinal change in the Zn concentration of breast milk. The symbol (○-○) represents the analytical results of samples which were collected from the same woman.

調整してある。

Zn 欠乏症の検査指標項目は、表 2 に示す通りである。第一に、血清中の Zn の低下が挙げられる。血清中の Zn は正常でおよそ $1 \mu\text{g}/\text{ml}$ であるが、 $0.6 \mu\text{g}/\text{ml}$ 以下になると Zn 欠乏状態と一般に認められている¹⁰⁾。赤血球の中には血清に比べて

およそ 10 倍の Zn が含まれており⁶⁾、赤血球中 Zn の低下、尿中 Zn の低下、Zn 含有酵素である血清アルカリフォスファターゼ活性の低下などが欠乏症の指標とされている。毛髪中の Zn は 70 ppm 以下になると、Zn 欠乏状態とされている¹¹⁾。

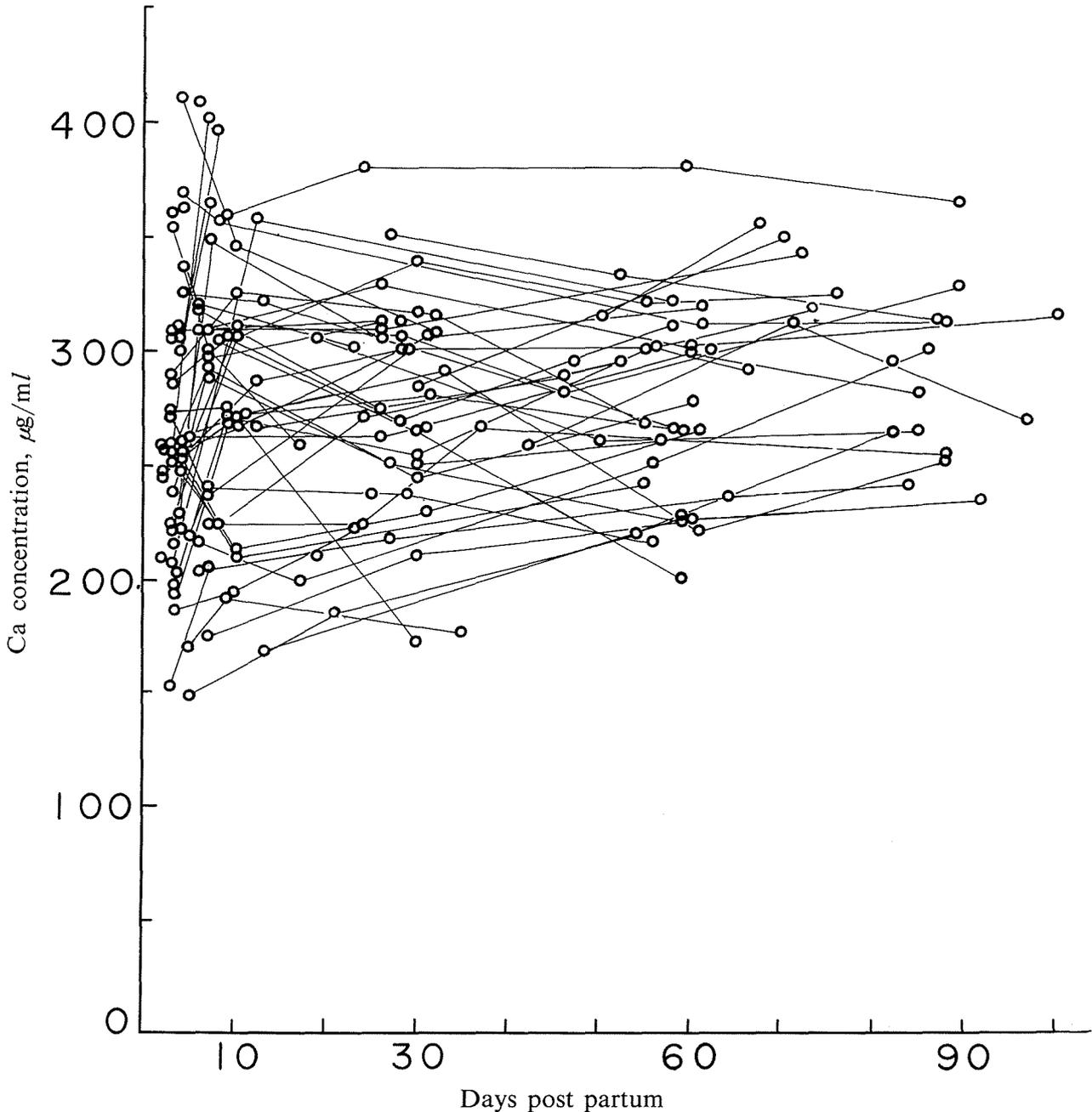


Fig. 5. Longitudinal change in the Ca concentration of breast milk.
See the lower legends at Fig. 4.

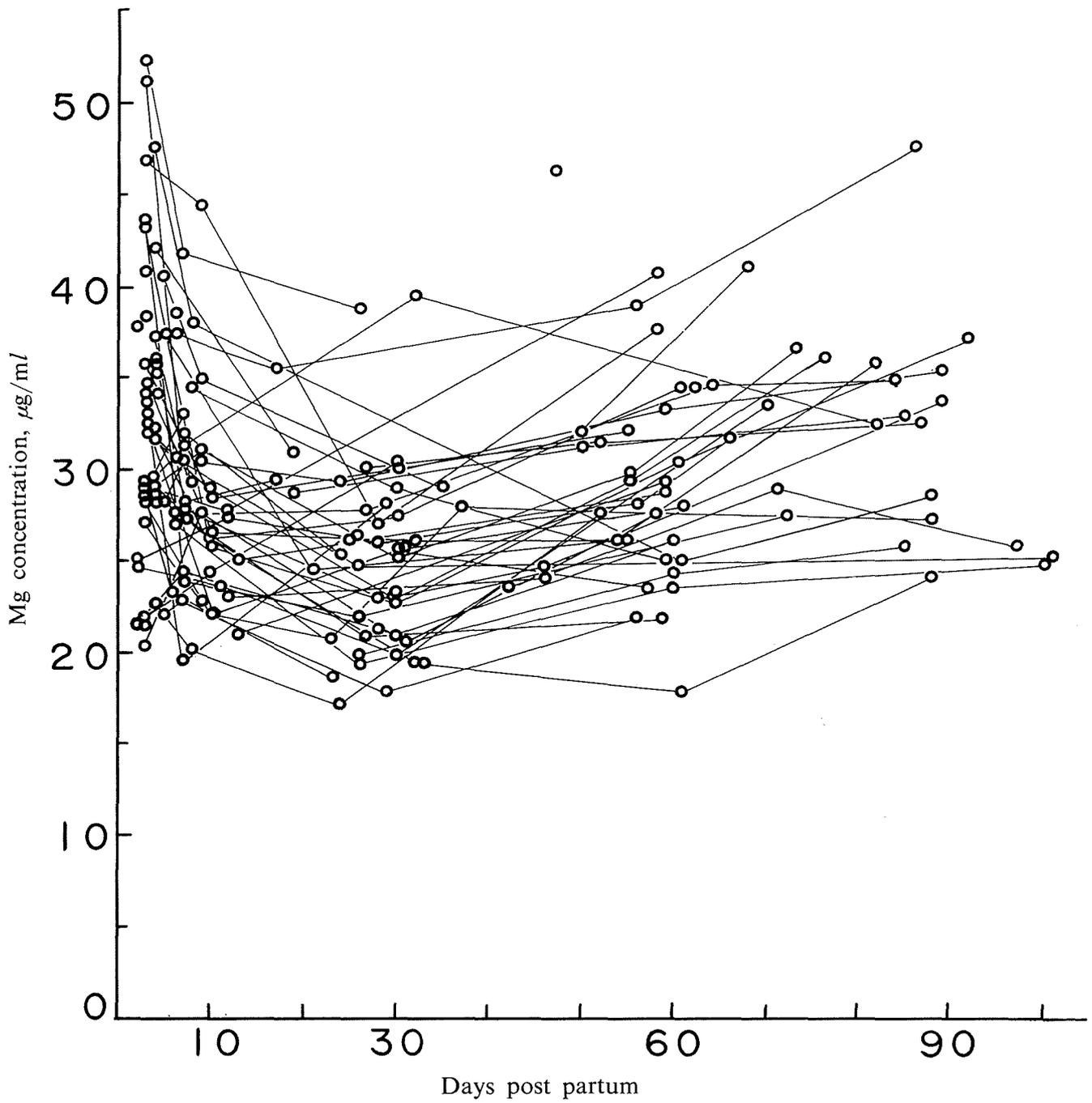


Fig. 6. Longitudinal change in the Mg concentration of breast milk.
See the lower legends at Fig. 4.

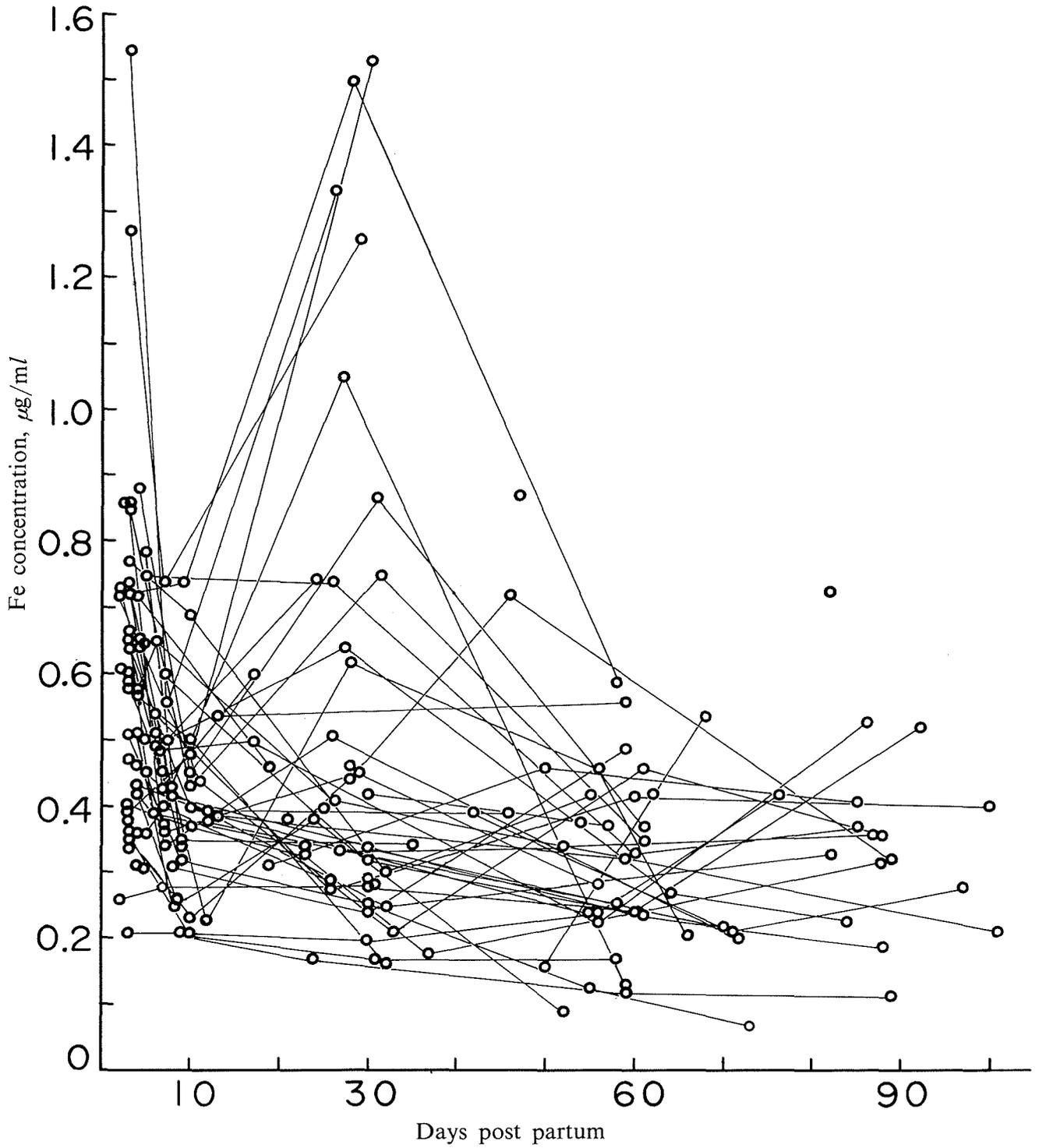


Fig. 7. Longitudinal change in the Fe concentration of breast milk.
See the lower legends at Fig. 4.

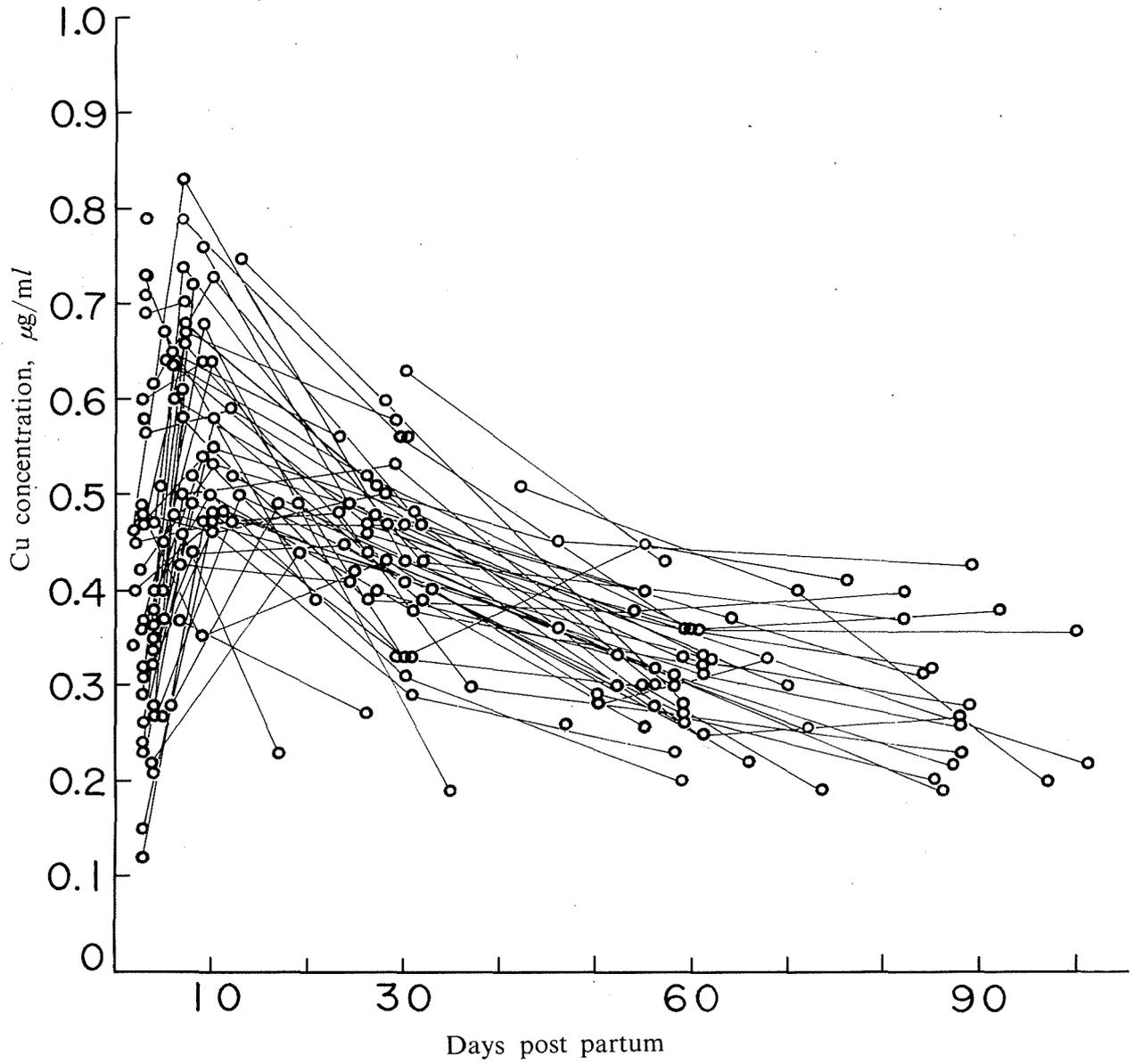


Fig. 8. Longitudinal change in the Cu concentration of breast milk.
See the lower legends at Fig. 4.

Table 3 Estimated daily intakes of iron, copper, zinc, calcium and magnesium on breast-fed infants

Stage of lactation	Daily intake of milk	Iron	Copper	Zinc	Calcium	Magnesium
days	m/			mg		
2-4	150	0.09	0.06	1.3	40	5
6-10	480	0.20	0.28	2.3	137	14
20-40	650	0.27	0.28	2.0	183	16
50-70	800	0.26	0.26	1.4	222	23
80-100	900	0.32	0.26	1.1	257	28
110-130	850	0.20	0.17	0.9	232	29

Table 4 Ranges of the concentrations of iron, copper, zinc, calcium and magnesium in powdered milk*

Dilution	Iron	Copper	Zinc	Calcium	Magnesium
			$\mu\text{g}/\text{ml}$		
14 %	7.6 - 10.4	0.020 - 0.056	0.81 - 1.74	422 - 604	33 - 64

* Five types of commercial products ; Yukijirushi's A, Wakodo's lebens 60, Meiji's FA, SMA S-26, Morinaga's G-80.

毛髪中の元素含有量は、一方ではからだに有害元素の暴露を受けた時の長期の暴露状態の指標として重要であることが認識されている。過去において、水俣病の患者の毛髪に高濃度の Hg が検出され、メチル Hg 中毒症である水俣病の原因究明に役立ったことがある。もう一方では、毛髪中の元素濃度はからだの中の必須元素の栄養状態の指標として分析されてきている。頭髪の成長速度は成人で 0.27~0.40 mm/日と報告されており¹²⁾、その平均値を使って計算すると1か月で約1 cm になる。頭皮近接部から12 cm 分の毛髪を分析を行えば、その人の1年間の体内元素の履歴を表すことになる。ただ、パーマや染毛などの外的因子によって毛髪中の元素含有量が影響を受けることが知られており^{13~15)}、そのような処理をした毛髪は元素分析に適さない。その点、ヒゲについては成人男子に限定されるが、上記の外的因子の影響が少なく、1~2日毎に連続的に採取できるという特性があることから、ヒゲを用いた元素分析も行われている¹⁶⁾。

図9は、年齢による毛髪中の Zn 含有量の推移を表したものである。図中の実線は、Hambidge¹¹⁾ がアメリカ合衆国のコロラド州デンバーで新生児から成人まで338人の頭髪の Zn 含有量を測定した結果を示している。図から分かるように、0.25~4才までの乳幼児の頭髪 Zn 含有量が、新生児(0才)や成人(17~40才)に比べて極端に低い値となっている。また、5才以上の小児で頭髪 Zn が 70 ppm 以下の者には、成長の遅れ、食欲不振、味覚感度の低下という Zn 欠乏症状が高い割合で見いだされたことも同時に報告している。一方、点線はタイのバンコクでの調査結果である。デンバーとバンコクでの調査結果を比較すると、4~7才以上では両都市で有意な差は認められないが、0.25~4才までの乳幼児期では、デンバーで頭髪 Zn はあきらかに低い結果となっている¹⁷⁾。このことには両都市での食生活習慣の違いが反映されていると考えられ、食習慣によっては乳幼児期に Zn 欠乏症を起こす可能性があることを示すデータと言える。

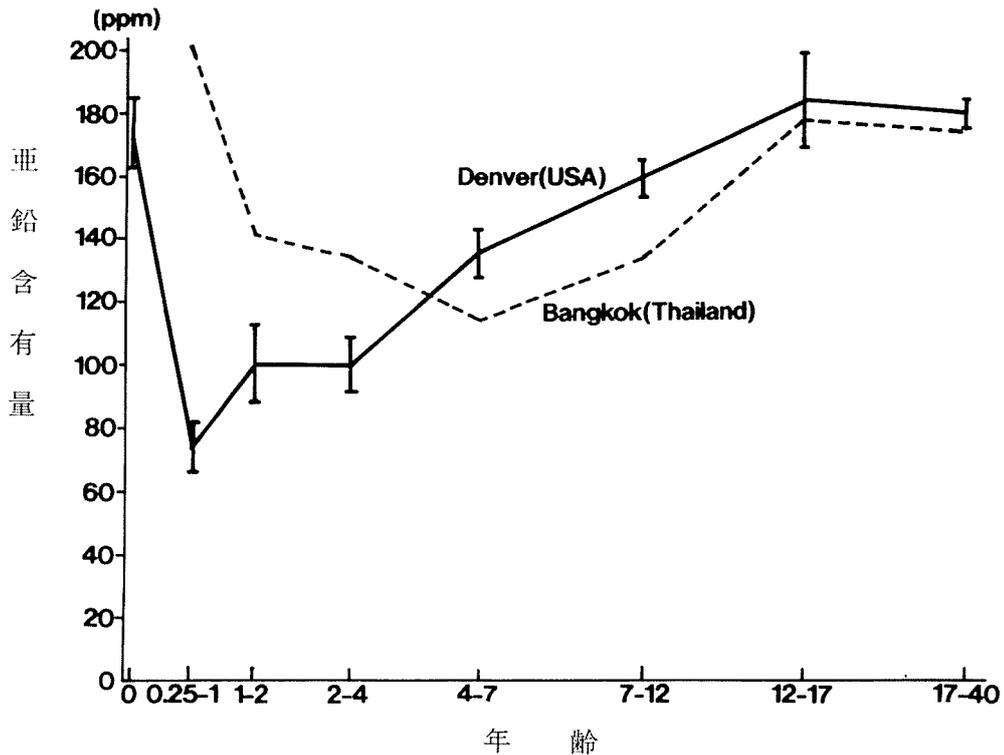


図 9. 年齢による毛髪中のZn含有量の推移 (Hambidge ら, 1972年, 1976年)

さて、乳幼児の Zn の 1 日必要摂取量は我が国ではまだ決められていない。ただ、日本小児科学会は粉乳栄養児に対する配慮から、粉乳から調整したミルク中の Zn 含有量を $2 \sim 6 \mu\text{g} / \text{ml}$ と勧告している¹⁸⁾。現在の乳児用調製粉乳(市販5社)中の Zn 量は、その成分表から常用の14%調乳時に $3.6 \sim 3.9 \text{ mg} / \text{l}$ と計算され、勧告値の範囲の中間値となっている。諸外国における乳用児の Zn の栄養所要量は、年齢が0～6か月で $2 \sim 5 \text{ mg} / \text{日}$ 、7～11か月で $3 \sim 5 \text{ mg} / \text{日}$ 、1～3歳で $4 \sim 10 \text{ mg} / \text{日}$ 、4～6歳で $5 \sim 10 \text{ mg} / \text{日}$ 、7～10歳で $7 \sim 15 \text{ mg} / \text{日}$ の範囲で決められている¹⁸⁾。

成人の 1 日 Zn 必要摂取量は我が国では 10 mg 程度と考えられ、諸外国では $8 \sim 15 \text{ mg} / \text{日}$ の範囲で決められている¹⁸⁾。アメリカ合衆国では、男性で $15 \text{ mg} / \text{日}$ 、女性で $12 \text{ mg} / \text{日}$ とされている。ただ、女性では妊婦で 3 mg 、授乳婦で 7 mg (産後6か月以内)、 4 mg (産後6～12か月)が胎児、乳児のために付加されている。中華人民共和国では男性、女性とも $15 \text{ mg} / \text{日}$ 、妊婦、授乳婦では $20 \text{ mg} / \text{日}$ とされている。

表5、表6は、日本食品無機質成分表¹⁹⁾のデータに基づいて植物性食品と動物性食品中の Zn 含有量をまとめたものである。Zn を可食部 100 g 当たり

2 mg 以上含む食品を Zn の多い食品として★印を付けた。表5の植物性食品の中では種実類や豆類に Zn 含有量の高い食品が多いことがわかる。食品別にみると、植物性食品の中では、ごまが可食部 100 g

表5 植物性食品中の亜鉛含有量 (可食部 100 g 当たりの mg 数)

食品群	含有量レベル	食品名 (含有量)
穀類	0.1 ~ 2.7	ごはん(0.5), ★ポップコーン(2.4), 食パン(0.8), うどん(0.3), そば(1.0)
いも類	0.2 ~ 0.5	さつまいも(0.2), じゃがいも(0.2)
種実類	0.4 ~ 7.1	★ごま(7.1), ★ピーナッツ(3.0), ★アーモンド(4.8), くり(0.6)
豆類	0.3 ~ 5.5	★そらまめ(4.6), 豆腐(0.7), ★高野豆腐(5.5), ★だいず(3.2), ★きな粉(3.5), 納豆(1.9), ★あずき(2.3), ゆであずき(0.9), ★豆みそ(2.0)
野菜類	0.1 ~ 1.2	玉ねぎ(0.2), キャベツ(0.2), きゅうり(0.2), だいこん(0.1), トマト(0.1), にんじん(0.1)
果実類	0.02 ~ 0.2	いちご(0.2), みかん(0.06), すいか(0.09), なし(0.09), バナナ(0.2), りんご(0.02)

★亜鉛の多い食品

日本食品無機質成分表(1991年)のデータから作成

表6 動物性食品中の亜鉛含有量
(可食部 100 g 当たりの mg 数)

食品群	含有量レベル	食品名(含有量)
魚類	0.3 ~ 7.2	あゆ(1.1), あじ(0.6), まいわし(1.2), ★煮干し(7.2), かれい(0.5), さけ(1.0), さば(0.8), ★うなぎかばやき(2.7), たい(0.4), さんま(0.7), まぐろ(0.5)
		★かき(40), ★しじみ(2.1), あかがい(1.5), ★ほたてがい(2.5), ★さざえ(2.2)
貝類	0.7 ~ 4.0 (1 ~ 3)	いか(1.3), ★するめ(5.4), くるまえび(1.6), ★松葉がに(3.1), ★ゆでだこ(2.1), ★ほや(5.3)
		★牛肉(2.3~4.5), 鶏肉(0.6~2.4), ハム(1.1), ★豚肉(1.8~2.9), ★羊肉(4.3~5.3), ★豚レバー(6.9), ★牛レバー・タン(3.8, 2.8)
いか・かに ・えび類	1.3 ~ 5.4	鶏卵(1.4), うずら卵(1.8), 牛乳(0.3), ★チーズ(3.2), バター(0.07)
卵・乳類	0.1 ~ 3.2	

★亜鉛の多い食品 日本食品無機質成分表(1991年)のデータから作成

当たり 7.1 mg と最も Zn 含有量の高い食品であるが、通常の摂取量を加味すると高野豆腐、豆みそ、きな粉、煮豆、ポップコーン、ピーナッツなどが Zn 摂取の多い食品と言える。野菜類、果実類はどれも Zn の少ない食品と言える。表6の動物性食品中の魚類の中では、煮干しが 7.2 mg/100 g と Zn の多い食品であるが、それは乾燥していることと骨を含むからである。杉山²⁰⁾ はあゆ(鳥取県日野川産)の各種臓器を分別し、重金属含有量を測定して、乾燥重量当たり Zn が筋肉に 41 ppm、骨に 186 ppm と報告している。肉類では、牛肉、豚肉、羊肉が Zn の多い食品と言える。表7に杉山²⁰⁾ が分析した獣鳥鯨肉類の重金属含有量を示した。このデータにおいても肉類では、牛肉、豚肉、羊肉で Zn が多く、それらに比べて鯨肉、鶏肉で Zn が低い値となっている。心疾患と栄養との関係で、杉山は食品中の Zn/Cu に注目して、肉類で 10~60 の高値を示していることを報告している。また、この Zn/Cu 比は獣肉類にくらべて魚肉で低く、豆・種実・野菜類は 10 以下の低値を示したことも報告している。

Zn 栄養に関して、植物性食品中の Zn より動物性食品中の Zn は吸収率が良く(30~70%)、Zn の利用率が高いとされている^{6, 21)}。これは食品中に存在する Zn とその他の成分との相互関係に起因する。植物由来のタンパク質中にはフィチン酸(イノ

表7 獣鳥鯨肉類の重金属含有量

食品	例数	Fe	Cu	Zn	Cd	Mn	Zn/Cu
牛 筋肉 も も	2	61	2	135	-	-	68
" " 肩ロース	2	81	3	196	-	-	65
鯨 筋肉	3	105	2	33	-	-	17
鶏 筋肉	3	15	2	21	-	-	11
" " も も	2	23	2	40	-	-	20
" 肝臓	2	38	20	87	0.9	5	4
" 卵 白色部	3	N.D	1	0.25	-	-	0.3
" " 黄色部	3	79	5	32	-	-	6
羊 筋肉 (ラム)	2	43	4	171	-	-	43
" " (マトン)	2	91	3	180	-	-	60
豚 筋肉 も も	2	17	1	50	-	-	50
" " 肩ロース	2	50	4	183	-	-	46
" 肝臓	2	77	107	771	0.4	6	7

(杉山恭子, 米子医学雑誌, 1981年)

シトール六リン酸)が多いので、その存在によって Zn の吸収は抑制される。食品中のフィチン酸含有量の1文献として Gontzea and Sutzescu の論文²²⁾がある。また、食品中の繊維質、Ca 含有量が高いことも Zn の利用率を減ずることが知られている⁶⁾。表6に鶏卵は Zn が 1.4 mg/100 g とあるが、表7から Zn のほとんどが黄身のほうに含まれていることが分かる。するめ、かにも Zn の多い食品である。貝類は総じて Zn 含有量が高く、しじみ豆みそ汁は Zn 栄養に関して良い食品といえる。かき(牡蠣)はすべての食品のなかで最も Zn が多く、可食部 100 g 当たり 40 mg という、けた外れに高い含有量である。すぐに利用できる形で体内に貯留されている Zn は非常に少ないので、Zn の通常の摂取量が少ないと Zn 欠乏の徴候はかなり急速に現れるとされている。ただ、バランスのとれた食事をしておれば、Zn が不足することはないと言える。菜食主義やダイエットで低蛋白食を長期に続けているような場合には、明らかに Zn 摂取の低下を招いていると考えられ、要注意である。

4. 現在注目されている微量元素 — セレン —

現在とくに注目されている微量元素として、セレン(Se)がある。Seの人体内総量は6~21 mg と非常に僅かである²³⁾。体内分布は腎臓、肝臓に多いとされている。Seの機能については、第一に、Seはグルタチオンペルオキシダーゼの構成成分であり、この酵素は脂質の過酸化による細胞膜の障害を防ぐ重要な働きをしている。また、ミトコンドリアの電

子伝達系の重要な構築物質である鉄イオン蛋白質とともに FeSe の型で存在し、NADHからの電子の受容体として働いていると考えられている²⁴⁾。ヒトにおける Se 欠乏症として心筋症を主徴とする克山病があるが、これには心臓でグルタチオンペルオキシダーゼが過酸化物の分解に主に働いていることで Se 欠乏に対する心臓の感受性が特に高い理由となっていることが反映されていると考えられている²⁵⁾。第二に、Se は Hg, Cd の毒性を軽減する効果がある。Fig. 10 はマウスに対する Hg と Se の同時投与によるお互いの毒性の軽減作用^{26, 27)}を示したものである。HgCl₂ と Na₂SeO₃ を等モルずつ同時投与したマウスではコントロールとほぼ同じ体重増加を示している。これは Hg と Se の拮抗作用 (antagonism) により互いの毒性が抑制された結果と考えている。

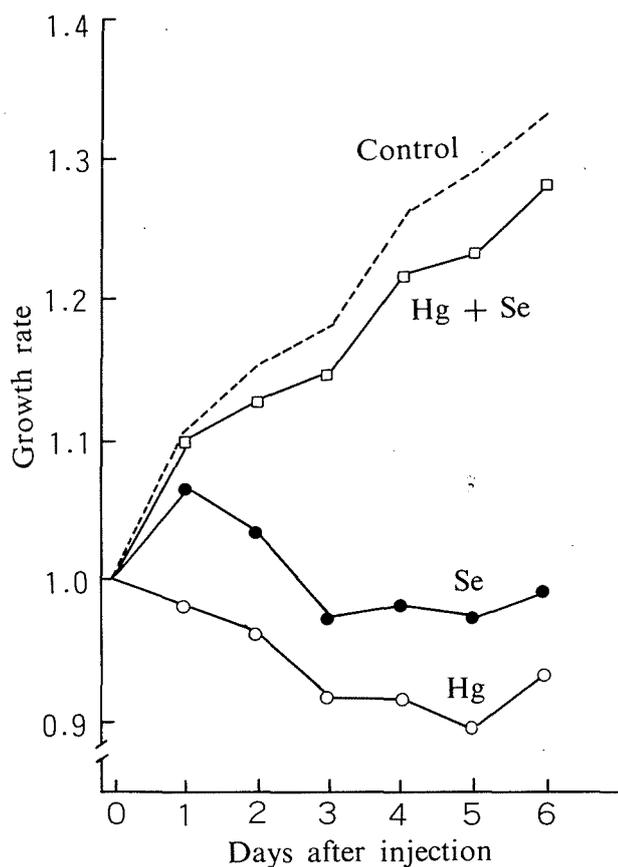


Fig. 10. Growth rate of mice administered with mercuric chloride and/or sodium selenite.

HgCl₂ (25 μmol/kg) and/or Na₂SeO₃ (25 μmol/kg) were administered iv.

(永沼 章, 衛生化学, 1983年)

無機 Hg と Se 化合物を実験動物に同時投与した際に、Hg と Se の著しい体内蓄積の起こることも知られている。現在、この現象は Se 化合物の代謝物が Hg と相互に作用して低毒性のモル比 1 対 1 の Hg-Se 高分子複合体を形成して蓄積するためであると考えられている^{27, 28)}。氏岡は²⁹⁾、生体組織中の Hg の定量法について周到な検討を行い、熊本県芦北町計石地区の猫の肝臓、水俣病で死亡した人の肝臓、腎臓に多量の Hg の蓄積と同時に Se の蓄積があったことをいち早く 1960 年に報告している。その 15 年後に、Kosta et al³⁰⁾ はユーゴスラビアの Hg 鉱山労働者の死後臓器を分析して、甲状腺、脳下垂体、腎臓、脳に Hg と Se がほぼモル比 1 : 1 で濃縮していたことを報告している。Ganther et al³¹⁾ は日本のうずら、ラットを使った動物実験でメチル Hg の毒性も Se が軽減することを示している。本邦では大井ら³²⁾、上田ら³³⁾ が Se によるメチル Hg 毒性の抑制効果を報告している。Fig. 11 は、海獣肝臓中の Hg と Se を分析してその含有量をプロットしたものである³⁴⁾。データはほぼ直線上に並び、Hg と Se のモル比はほぼ 1 : 1 である。イルカやアザランが Hg をかなりの量濃縮しているにも関わらず、Hg 中毒にならないのは、同時に Se も濃縮しているからである。

第三に、Se による発ガンの予防効果³⁵⁾、制ガン剤の副作用を軽減する効果²⁷⁾がある。現在 Se に注目が集まっている主な理由は、発ガンの予防効果についてである。

Shamberger et al^{36, 37)} は、米国での調査で飼料穀物中の Se 含有量が高い州では低い州に比べてガン死亡率が有意に低いことと、19 市での血液中 Se 濃度とガン死亡率の間に有意な負の相関を示すことをはじめて報告した。その後、Schrauzer et al³⁸⁾ は、27 か国の食物消費データから計算した国別の 1 日 Se 摂取量および 22 か国の全血中 Se 濃度が 数種 のガン (結腸ガン、直腸ガン、乳ガン、前立腺ガン、白血病) の国別死亡率との間でいずれも有意な ($p < 0.01$) 逆相関を示すことを報告した。これらのことから、からだの中の Se 量が多くなればガンの発生率が減るのではないかと推測される。この逆相関の発見以来、Se の発ガン予防に関してかなりの調査・研究が行われてきているが、ガン発症前の血中 Se 濃度を用いての症例・対照研究の 2 報告^{39, 40)} によって、一部のガン (消化器ガン、前立腺ガン、肺ガン、造血器のガン) に対しての

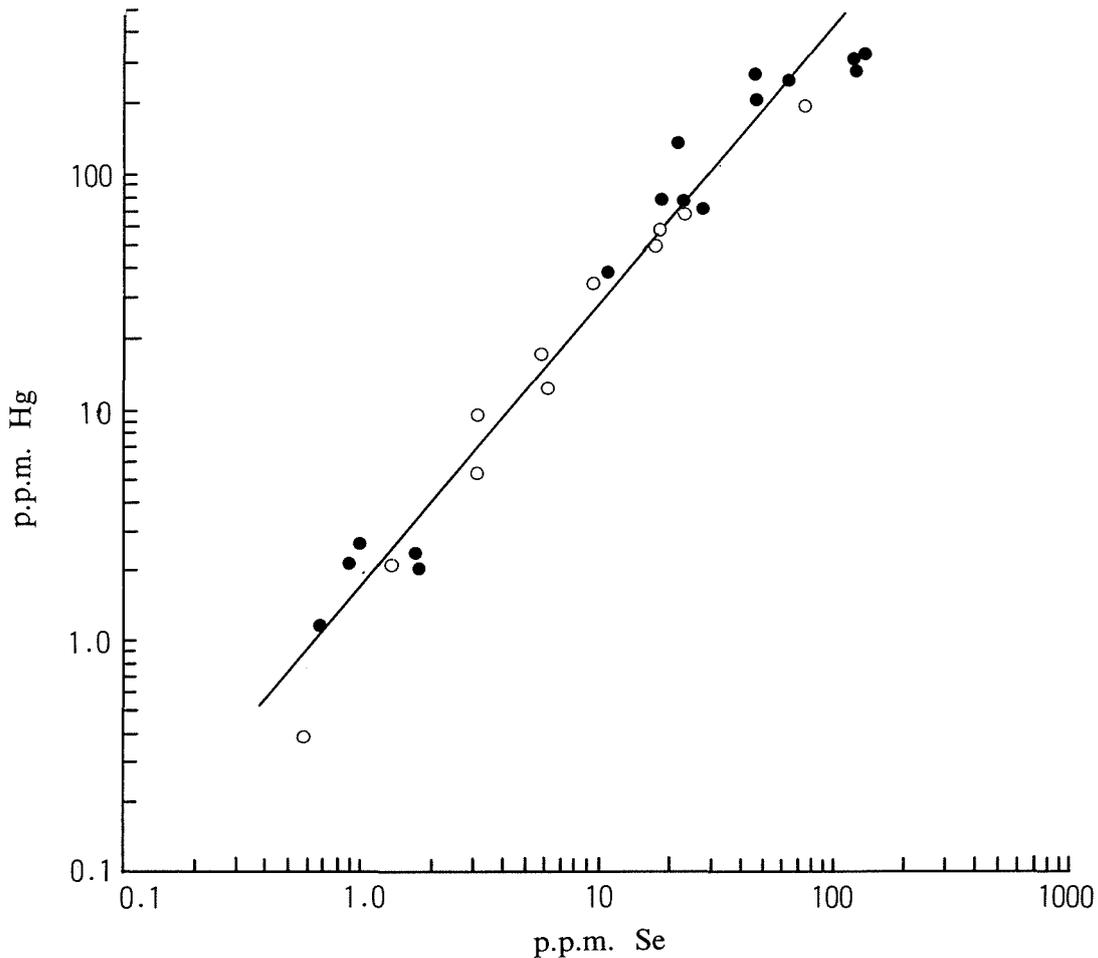


Fig. 11. Correlation between mercury and selenium in the livers of marine mammals.

○, Dolphins and porpoises ; ●, common seal.

(Koemanら, Nature, 1973年)

Seによる予防効果の信頼性は高いとされている³⁵⁾。さて、Seの摂取量については、和田ら⁴¹⁾は1日Se摂取量が0.01 mgで欠乏レベル、0.03 mgで準欠乏レベル、0.1 mgで栄養レベル、0.2 mgで過剰レベル、1.0 mgで中毒危険レベル、5.0 mgで中毒レベルとして分類しており、適正摂取レベルの範囲が狭いのが特徴である。つまり、実際には善玉性と悪玉性が狭い摂取量範囲で交替して出現することから、Seは両刃の剣の様な元素といえる。アメリカ合衆国においてはSeの1日当たり推奨栄養所要量は、乳幼児(0~6歳)で10~20 μg 、7~10歳で30 μg 、11~14歳で男性が40 μg 、女性が45 μg 、15~18歳で男性、女性とも50 μg 、19歳以上の成人で男性が70 μg 、女性が55 μg とされている¹⁸⁾。日本でのSeの栄養所要量は未定であるが、1日当たりのSe摂取量は100~200 μg ⁴²⁾と推定されていることから当を得たものと思われる。表8は、野田ら⁴²⁾の報告した食品中のSe含有量の

表8 食品中のセレン含有量

(数値は乾燥重量当たりのppb)

[穀類]	ごはん(14), 食パン(562), 精白米(15), 小麦粉(106), そば粒(196)
[いも類]	じゃがいも(3), さつまいも(56)
[種実類]	ごま(黒 242, 白 138)
[豆類]	みそ(61), 豆乳(465), きな粉(285)
[野菜類]	キャベツ(1), にんじん(10), きゅうり(<1), たまねぎ(56), トマト(<10), ねぎ(22), はくさい(71), だいこん(32), ほうれんそう(11)
[果実類]	りんご(<1), バナナ(<10), レモン(<10), みかん(2), なし(<10), 柿(22), すいか(<10)
[魚介類]	さば(1645), いわし(1718), きす(1328) かき(707), えび(2520)
[藻類]	のり(182), わかめ(390), こんぶ(<10), ひじき(<10)
[獣鳥・肉類]	牛肉(480), 鶏肉(532), 豚肉(902)
[乳・卵類]	牛乳(300), 鶏卵(187)

(野田克彦ら, 栄養と食糧, 1980年)

データをまとめたものである。一般に、Se含有量は動物性食品（とくに魚貝類）で高く、植物性食品で低いと言える。植物性食品では、植物が成育した土壤によってSe含有量が大きく変動すると言われている。土壤中のSe含有量に地域差が大きく、それが植物中のSe量に反映することになる。土壤中のSeは火山起源説が有力であり、火山国の日本は世界最大のSe生産国である。したがって日本の平均Se摂取量は他の国に比較してかなり高く、局部的にSeの少ない土壤地域で余程植物性食品に偏った食生活をしない限りSeが不足する可能性はないと考えられる。母乳中のSe含有量については、アメリカ合衆国ではDebski et al⁴³⁾の $15.2 \pm 0.6 \text{ ng/ml}$ （健常産婦10人、平均±標準誤差）という報告がある。日本では、玉利ら⁴⁴⁾が健康な産婦3

人の母乳においては初乳で 29.4 ng/g と高く、産後1週目にかけて急激に減少し、産後10日以降171日までほぼ一定で $9.0 \pm 1.2 \text{ ng/g}$ と報告している。加えて、市販の乳児用調製粉乳（6種類）の14%調乳時のSe濃度を、 $3.6 \pm 0.6 \text{ ng/ml}$ と報告している。一方、河本、筆者ら⁴⁵⁾は、正常出産の産婦24人から得た母乳のSe含有量を産後1週以内で $25.0 \sim 69.6 \text{ ng/ml}$ 、産後1か月で $12.0 \sim 40.8 \text{ ng/ml}$ と報告している。また、異常出産の産婦5人から得た母乳では、正常出産例に比べて産後1週以内で低値を示し、産後1か月では正常出産例と同程度であった（図12）。現在、乳幼児期のSeの生理学的意義は不明であるが、この分野でのSeに関するデータの蓄積が大切であると考えられる。

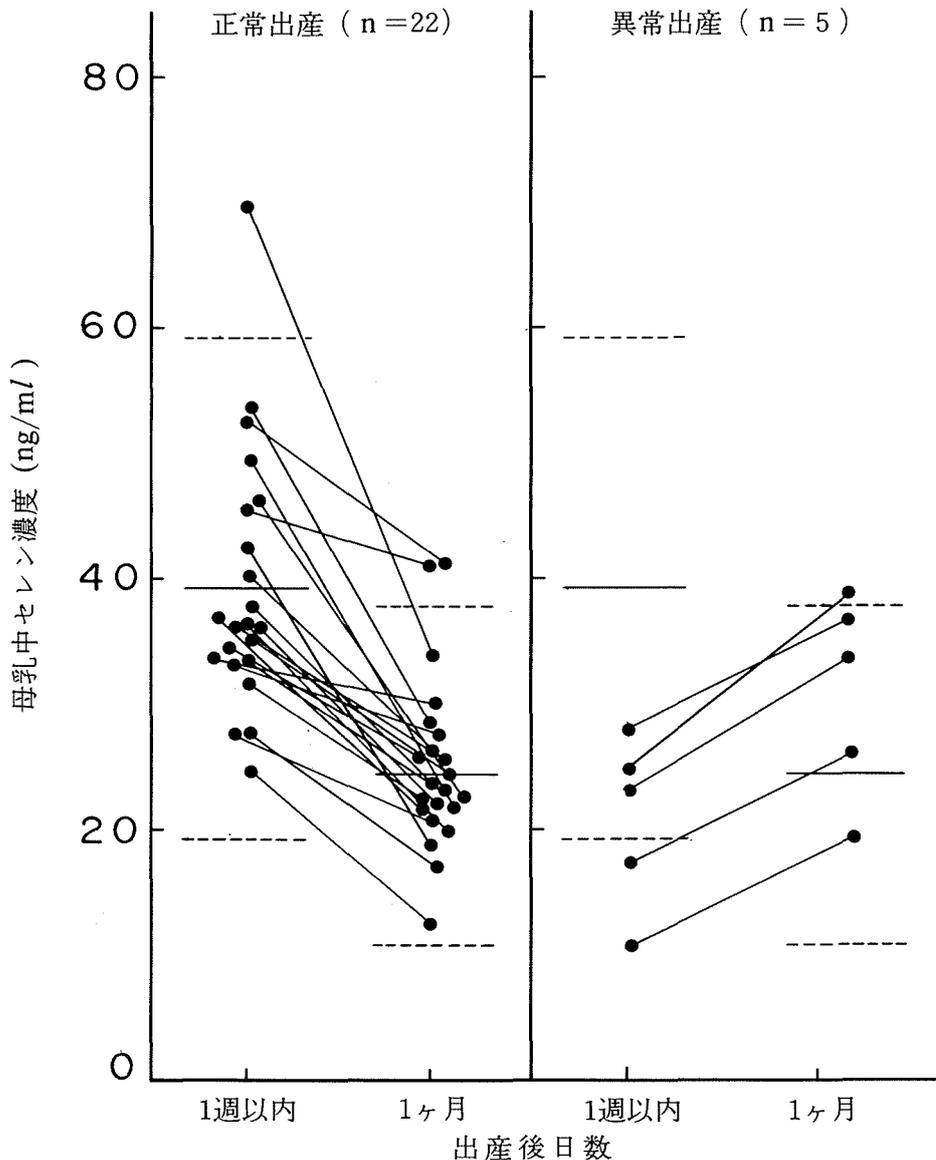


図 12 母乳中のセレン含有量

5. 今後注目される微量元素 —珪素—

珪素 (Si, silicon, シリコン) は、自然界には二酸化珪素、珪酸塩として広く分布している。地殻の主要構成元素 (クラーク数は 25.8 で、酸素の 49.5 について第 2 位) である。単体の珪素はダイヤモンド型構造をとり、半導体素子として現代の電子産業を支えている。

生物学の分野では、植物の生育に及ぼす Si の影響についての研究成果は多い。それらの成果については、高橋の著作^{46~48)}に詳しい。ところが、ヒトの健康と珪素の関係では、産業衛生の領域で、遊離珪酸 (SiO_2 , 石英, 珪石等) 粉塵の多量暴露を受ける職種において強い線維増殖を主体とする珪肺 (silicosis) が起こることが以前から知られているだけであった。珪肺の発生機序としては、遊離珪酸塵を貪食したマクロファージが崩壊し、その際の遊離物質が線維芽細胞に作用して、線維増殖を起

すと考えられている⁴⁹⁾。筆者と谷川は、固体状の遊離珪酸 (SiO_2) 粒子がマクロファージ細胞を破壊するのに対して、水溶性のオルトケイ酸 (H_4SiO_4) のマクロファージに対する毒性の程度を、組織培養法により検討した⁵⁰⁾。図 13 は、オルトケイ酸無添加 (対照) または添加培地で培養したマクロファージの食作用状態を示す。供試細胞としては、マウス tsA 640-トランスフォームドマクロファージ⁵¹⁾を用い、48 時間培養後、抗羊赤血球 IgG で感作した羊赤血球の取り込み細胞数 (写真中の矢印) を食作用活性の指標とした。対照 (A) での食作用陽性率は、 $80.8 \pm 3.7\%$ であった。オルトケイ酸添加濃度が 1.0, 2.0, 4.0 mmol/l の時の食作用陽性率は、それぞれ $75.9 \pm 4.4\%$ (B), $52.8 \pm 3.8\%$ (C), $4.8 \pm 4.4\%$ (D) となった⁵⁰⁾。オルトケイ酸の、マクロファージの Fc セレプター仲介による食作用活性最小抑制濃度は、1.0 ~ 2.0 mmol/l と判定可能であり、かなり高濃度

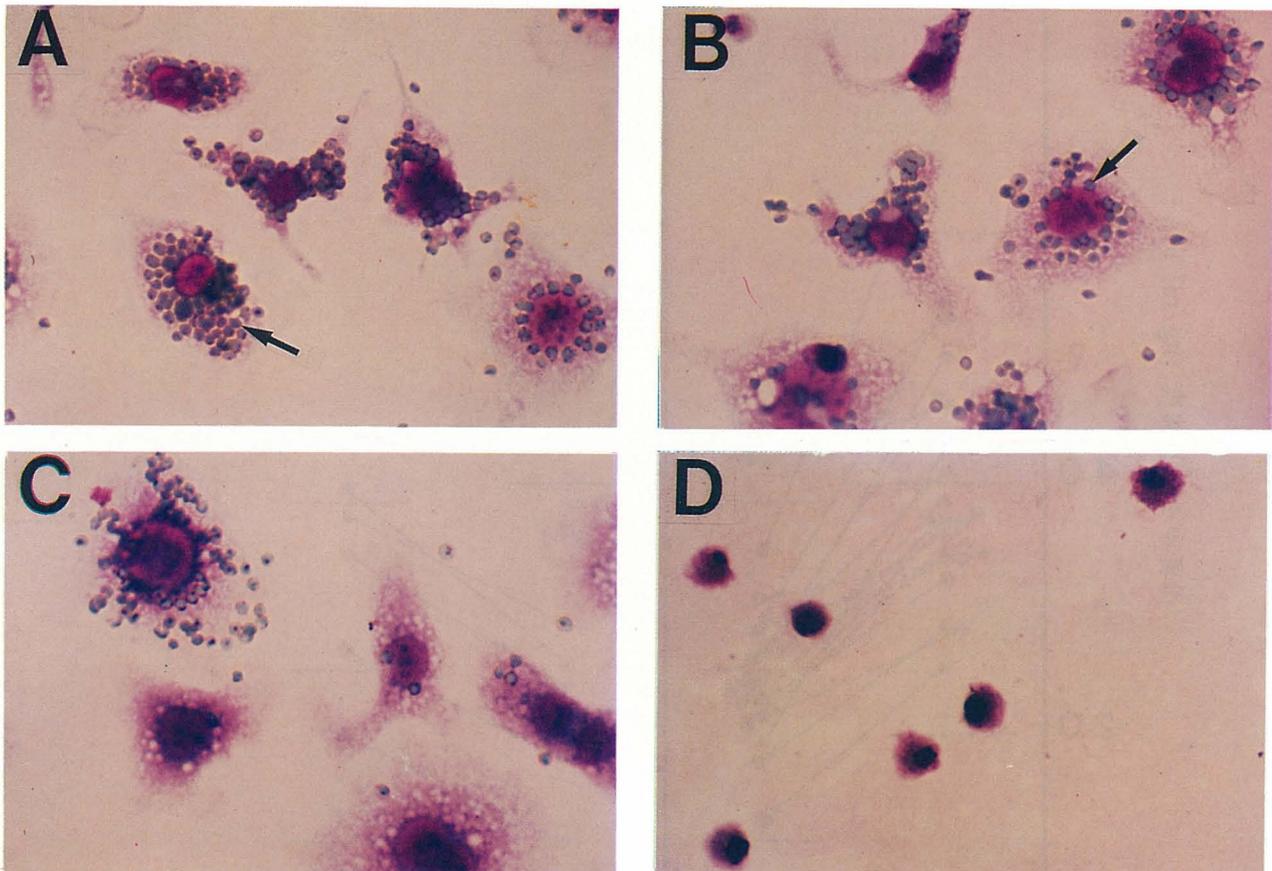


図13. マクロファージの食作用に及ぼすオルトケイ酸の影響

オルトケイ酸濃度：A, 無添加(対照)；B, 1.0 mmol/l；C, 2.0 mmol/l；D, 4.0 mmol/l.

であった。この濃度は、マクロファージ細胞内への Si の取り込みが観測された最小培地中濃度とほぼ一致した⁵²⁾。また、この濃度は同時に検討した亜セレン酸の最小抑制濃度の 100 ~ 200 倍に相当した。固体の無水珪酸粒子がマクロファージに強い毒性を

示すのに対して、水溶性化学種であるオルトケイ酸の毒性は弱いと考える。培地 (pH = 7.3) 中でのオルトケイ酸の化学種はほとんどが分子種であると考えられる (図 14, 文献⁵³⁾ の pK 値を使って計算)。

オルトケイ酸 (H₄SiO₄)

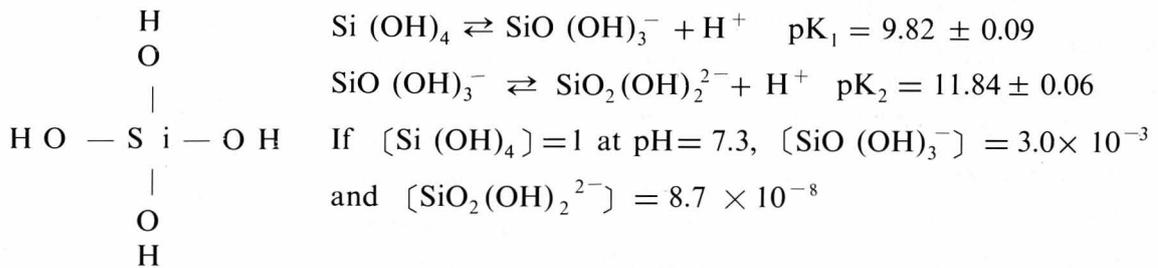
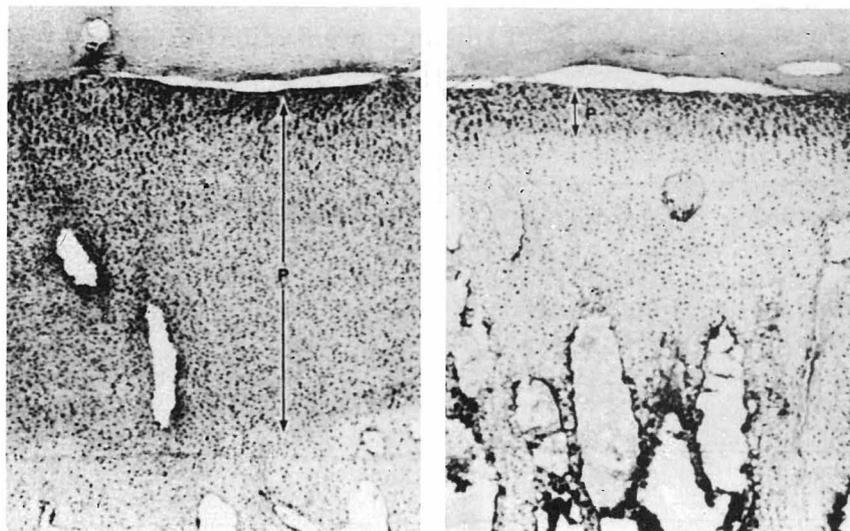


図 1 4. 水溶液中のオルトケイ酸の化学種の計算 (pH = 7.3)

最近、Si の上記のような悪玉面ではなく、善玉面が少しずつ分かってきた。第一に、動物実験で Si がコラーゲン合成、ムコ多糖合成を通して結合組織の構築と骨形成に強く関係していることが、Carlisle の精力的な研究^{54~56)}で明らかになってきた。この方面の概要を紹介した和文の総説^{57, 58)}、資料⁵⁹⁾がある。図 15 は、Si と骨形成の関係を示したもので、Si 供給食および Si 欠乏食で飼育したニワトリの脛骨の骨端軟骨の顕微鏡写真⁶⁰⁾である。写真中 p の範囲が軟骨細胞の増殖層を表してい

る。Si 欠乏食餌のニワトリでは、明らかにその細胞増殖層が狭く、Si 供給食餌の場合の 7 ~ 8 分の 1 になっている。従って、Si 欠乏が骨形成の抑制・遅延を導くことを示している。

第二に、Si が動脈硬化症の予防因子として働く可能性がある点である。フィンランドの疫学調査で、Schwarz et al⁶¹⁾ は飲料水に Si 含有量が高い地区では冠状動脈硬化による心臓病の死亡率が低かったと報告し、Loeper et al⁶²⁾ は、ヒトの大動脈の Si 含有量がアテローム性動脈硬化の進展



Si 供給食

Si 欠乏食

図 1 5. 珪素と骨形成 (Carlisle, 1980 年)

とともに減少する傾向を示すことを報告した。また、Siは動脈壁への脂質の沈着を防ぐ効果を示したことを、ウサギを使った動物実験で報告している。ただ、Nakashima et al.⁶³⁾は、ヒト大動脈のSi含有量がアテローム性動脈硬化の進行にともなって、正常部分、脂肪線条部分、アテローム(粥腫)部分の順に増加する傾向を示すことを報告しており、矛盾が残されている。

第三は、慶応義塾大学医学部薬化学研究所のグループが、有機珪素化合物に抗腫瘍活性(癌細胞増殖抑制効果、遅延性免疫反応の活性化効果、Lewis肺癌の転移抑制効果)^{64~69)}を示すものがあることを報告してきている点である。

有機珪素化合物のうち $R_nSiO_{(4-n)/2m}$ で表されるオルガノポリシロキサン類の総称をシリコン(Silicone)という。シリコンは、繰り返し構造単位としてのSi-O骨格を有し、またSi-C結合によりSi原子にある割合で結合した有機官能基Rを有している⁷⁰⁾。生体にはシリコンは抗血栓性材料(シリコンゴム)や、膜型人工肺(シリコン均質膜のコイル型肺、ポリプロピレンの多孔質膜をシリコンでコーティングした複合膜)、人工水晶体(レンズとレンズ支持部の一部にシリコンゴム)、人工皮膚(コラーゲン-コンドロイチン硫酸スポンジ+シリコン膜)などの素材として利用されている。もう一方の重要な生体関連Si化合物に、バイオセラミックス(bioceramics)のうちのインプラントセラミックスがある。インプラントセラミックスには、生体活性(bioactive)セラミックスと生体不活性(bioinert)セラミ

ックスがある。生体活性セラミックスは骨組織と直接結合する生体親和性の高い材料として登場した。人工骨、人工関節、人工歯根、骨折合材の材料として利用されるSi含有生体活性セラミックスに、生体ガラス(バイオガラス $SiO_2-CaO-Na_2O-P_2O_5$ 、セラビタール $SiO_2-CaO-Na_2O-P_2O_5-K_2O-MgO$ ほか)と結晶化ガラス(A-W結晶化ガラス $SiO_2-CaO-MgO-P_2O_5$)がある。このように、人工臓器、組織の素材として、Si含有化合物のシリコンやセラミックスがからだの中で使用されてきている、あるいは使用されようとしている現状を考えると、Siの生体影響に関する興味は今後格段に強くなり、Siの生体影響に関する研究情報の必要性が高まるものと思われる。

生体中のSi含有量のデータは、和田⁷¹⁾がまとめたものがあるので、参考にされたい。Table 9は、筆者ら⁷²⁾がヒト血清中のSi含有量の報告データのうち信頼できると考えたものをまとめたものである。Table 10は、産後の母体血清、母乳中のSi含有量を測定したデータをまとめたものである⁷²⁾。Siの1日推定摂取量は41 mg⁷³⁾とされ、飲水からの摂取量が他の食品からの摂取量に比べて最も高い値をとるとされている。尿中Si 1日排泄量は、国外ではDobbie and Smith⁷⁴⁾の男性で 8.7 ± 4.2 mg、女性で 5.6 ± 2.2 mg(平均±標準偏差、男性66人、女性72人)、Berlyne et al.⁷⁵⁾の 33.1 ± 18.6 mg(23人)の報告があり、国内では筆者ら⁷⁶⁾の男性で 21.2 ± 4.5 mg(7人)、女性で 14.9 ± 3.5 mg(6人)の報告がある。

Table 9 Previously reported values of silicon concentrations in normal human serum

Author and year	Analytical technique	No. of subjects	Si concentration*, $\mu\text{mol/l}$
McGavack et al., 1962	Colorimetry	11	31
Lo et al., 1978	GF-AAS**	5	27
Dobbie et al., 1982	Fame AAS	50	21.5 ± 4.5
Berlyne et al., 1983	GF-AAS	21	11.0 ± 2.9
Koshiishi et al., 1985	HPLC***	5	33 ± 17
Tanaka, 1986	ICP-AES****	30	8.5 ± 3.0
Berlyne et al., 1986	GF-AAS	23	9.4 ± 2.0

*: Values are expressed as means or means \pm S.D.. ** : Graphite furnace-atomic absorption spectrometry *** : High-performance liquid chromatography **** : Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry

Table 10 Silicon concentrations in maternal serum and breast milk

Data in $\mu\text{mol/l}$.

Postpartum period	Subject	n	Maternal serum		Breast milk	
			Geometric mean (Range)	95 % confidence interval	Geometric mean (Range)	95 % confidence interval
1 week	Primipara	19	9.7	8.4-11.3	5.5	4.7-6.4
	Multipara	19	9.7	8.3-11.3	7.3	5.7-9.3
	Total	38	9.7 (5.4-18.5)	8.8-10.8	6.3 (3.2-20.3)	5.4-7.3
1 month	Primipara	19	7.5	6.3-9.0	6.8	5.3-8.7
	Multipara	19	8.7	7.2-10.5	5.4	4.3-6.8
	Total	38	8.1 (3.8-18.8)	7.1-9.2	6.1 (1.5-16.2)	5.1-7.2

n: Number of subjects. * : statistically significant at the level of $p < 0.05$.

生体のSiの研究は、まだ始まったばかりである。

稿を終えるにあたり、恩師石沢正一先生、山本勇麓先生、能勢隆之先生、林康久先生をはじめ共同研究者の皆様に感謝致します。

文 献

- 1) Underwood EJ : 微量元素—栄養と毒性—, 日本化学会訳編, 丸善, 1975.
- 2) 田中俊行, 動物性食品中の重金属の存在状態に関する研究, 米子医学雑誌, **33**, 574-593, 1982.
- 3) 石沢正一, 林康久, 田中俊行, 微量元素の臨床における二, 三の問題, ぶんせき, **1981**, 42-45, 1981.
- 4) 石沢正一, 微量金属とその臨床的意義, 臨床病理, **26**, 37-43, 1978.
- 5) 戸田昭三: 嫌われ元素は働き者, 日本化学会編, p 3, 大日本図書, 1992.
- 6) National Research Council 編: 環境汚染物質の生体への影響17, 亜鉛, 山根靖宏・富田寛・玄番昭夫・石山英一・坂井和男訳, 東京化学同人, p 290, 1986.
- 7) 山口孝子, 皮膚組織中の金属含有量に関する研究, 米子医学雑誌, **39**, 168-182, 1988.
- 8) 江崎信芳, 左右田健次, 遺伝子と微量元素, 最新医学, 45, 764-769, 1990.
- 9) 能勢隆之, 田中俊行, 石沢正一, 渡辺明美, 山

本登美子, 母乳中のカルシウム, マグネシウム, 亜鉛, 銅, 鉄含有量, 鳥取医学雑誌, **9** (増刊号), 126-129, 1981.

- 10) 和田 攻, 山崎信行, 沢本 豊, 広範囲血液・尿化学検査免疫学的検査—その数値をどう読むか—, 亜鉛, 日本臨床, **598**, 737-741, 1989.
- 11) Hambidge KM, Hambidge C, Jacobs M and Baum JD, Low Levels of Zinc in Hair, Anorexia, Poor Growth, and Hypogeusia in Children, *Pediatr Res*, **6**, 868-874, 1972.
- 12) Flesch P : *Physiology and Biochemistry of the Skin*, 3rd Ed, edited by Stephen Rothman, p 616, The University of Chicago Press, Chicago, 1961.
- 13) KUR 毛髪分析グループ(林 竹男, 小山睦夫, 武内孝之, 高田実称, 林 禎彦, 大森左与子, 日下 譲, 辻 治彦, 志野木正樹, 青木 敦, 片山幸士, 狐塚 寛, 富山 毅): 日本人の毛髪中の微量元素, p 12, 京都大学原子炉実験所附属原子炉応用センター, 1979.
- 14) Dipietro ES, Phillips DC, Paschal DC and Neese JW, Determination of trace elements in human hair. Reference intervals for 28 elements in nonoccupationally exposed adults in the US and effects of hair treatments, *Biol Trace Element Res*, **22**, 83-100, 1989.

- 15) 狐塚 寛, 毛髪放射化分析(第8報), 毛髪中微量元素含有量に影響する各種要因, 衛生化学, **18**, 7-12, 1972.
- 16) 小林淑子, 児島三郎, 山本 淳, 金田吉男, 西野幸典, 糸川嘉則, ヒゲを用いた生体中水銀量の評価, 日本衛生学雑誌, **43**, 979-986, 1988.
- 17) Hambidge KM and Walravens PA: Trace Elements in Human Health and Disease, Volume 1 Zinc and Copper, edited by Prasad AS and Oberleas D, pp 21-32, Academic Press, New York San Francisco London, 1976.
- 18) 厚生省保健医療局健康増進栄養課: 第四次改定日本人の栄養所要量, 第一出版, 1989.
- 19) 科学技術庁資源調査会: 日本食品無機質成分表, 四訂日本食品標準成分表のフォローアップに関する調査報告Ⅲ, 大蔵省印刷局, 1991.
- 20) 杉山恭子, 食品中の重金属含有量に関する研究, 米子医学雑誌, **32**, 408-425, 1981.
- 21) 木村美恵子, 微量元素欠乏症に関する考察, 最新医学, **45**, 725-732, 1990.
- 22) Gontzea I and Sutzescu P, Natural Antinutritive Substances in Foodstuffs and Forages, S Karger, New York, 1968.
- 23) 木村修一, 微量元素の必須性, 最新医学, **45**, 808-815, 1990.
- 24) 中野 稔: 元素からみた生化学, p 143, メディカルトリビューン, 1989.
- 25) 平山紀美子, 安武 章, 井上正康, 微量金属と活性酸素毒性, 最新医学, **45**, 802-807, 1990.
- 26) 永沼 章, セレンと水銀の生体内相互作用, 衛生化学, **29**, 173-187, 1983.
- 27) 井村伸正: 微量元素と生体, 木村修一・左右田健次編, pp 57-71, 1987.
- 28) 小宮和英, 小池いずみ, 河内佐十, 桜井 弘, セレンによる水銀の減毒作用に関する研究(第1報), 無機水銀の毒性に対する各種セレン化合物の減毒効果と水銀およびセレンの体内分布の関係, 衛生化学, **23**, 235-243, 1977.
- 29) 氏岡威令, 食品ならびに動物諸臓器中の水銀に関する化学分析的研究, 熊本医学会雑誌, **34**, 補冊, 383-399, 1960.
- 30) Kosta L, Byrne AR and Zelenko V, Correlation between Selenium and Mercury in Man Following Exposure to Inorganic Mercury, Nature, **254**, 238-239, 1975.
- 31) Ganther HE, Goudie C, Sunde ML, Kopecky MJ, Wagner PSO and Hoekstra WG, Selenium: Relation to Decreased Toxicity of Methylmercury Added to Diets Containing Tuna, Science, **175**, 1122-1124, 1972.
- 32) 大井 玄, 西垣 進, 関比呂伸, 田村行弘, 今野ヒロ子, 蓑輪佳子, 野牛 弘: 水銀とセレン, 鈴木継美, 大井 玄・井村伸正編, pp 132-148, 1977.
- 33) 上田喜一, 河合正計, 山中すみへ, 東条憲一: 水銀とセレン, 鈴木継美・大井 玄・井村伸正編, pp 105-117, 1977.
- 34) Koeman JH, Peeters WHM, Koudstaal-Hol, Tjioe PS and de Goeij JJM, Mercury-Selenium Correlations Marine Mammals, Nature, **245**, 385-386, 1973.
- 35) 浜島信之, セレニウムと健康障害-特にがんをめぐる疫学研究-, 日本公衆衛生学雑誌, **34**, 405-412, 1987.
- 36) Shamberger RJ and Frost DV, Possible Protective Effect of Selenium against Human Cancer, Canad Med Ass J, **100**, 682, 1969.
- 37) Shamberger RJ, Tytko SA and Willis CE, Antioxidants and Cancer. Part VI. Selenium and Age-Adjusted Human Cancer Mortality, Arch Environ Health, **1**, 231-235 1976.
- 38) Schrauzer GN, White DA and Schneider CJ, Cancer Mortality Correlation Studies-III: Statistical Associations with Dietary Selenium Intakes, Bioinorg Chem, **7**, 23-34, 1977.
- 39) Willett WC, Polk BF, Morris JS, Stampfer MJ, Pressel S, Rosner B, Taylor JO, Schneider K and Hames CG, Prediagnostic Serum Selenium and Risk of Cancer, Lancet, **2**, 130-134, 1983.
- 40) Salonen JT, Alfthan G, Huttunen JK and Puska P, Association Between Serum Selenium and the Risk of Cancer, Am J Epidemiol, **120**, 342-349, 1984.
- 41) 和田 攻, 真鍋重夫, 北川泰久, 石川晋介, 長橋 捷: 微量元素と生体, 木村修一, 左右田健次編, pp 74-93, 1987.
- 42) 野田克彦, 平井昭司, 檀原 宏, 放射化分析法

- による食品中セレン含量の測定, 栄養と食糧, **33**, 93-99, 1980.
- 43) Debski B, Picciano MF and Milner JA, Selenium Content and Distribution of Human, Cow and Goat Milk, *J Nutr*, **117**, 1091-1097, 1987.
- 44) 玉利祐三, 西村由美, 辻 治雄, 日下 譲, 母乳・人工乳中のセレン濃度及び乳児のセレン摂取量, *Biomed Res Trace Elements*, **2**(2), 123-124, 1991.
- 45) 河本裕子, 田中俊行, 前田隆子, 蛍光法による母乳中セレン測定, *臨床病理*, **40**(補), 299, 1992.
- 46) 高橋英一, ケイ素の生物学, 京都大学食糧科学研究所報告, **33**, 61-84, 1970.
- 47) 高橋英一, ケイ酸植物と石灰植物, 農山漁村文化協会, 1987.
- 48) 高橋英一, 植物におけるシリカの役割, *化学*, **45**(5), 299-305, 1990.
- 49) 藤原元典・渡辺巖一編: 総合衛生公衆衛生学, pp 421-424, 南江堂, 1978.
- 50) 田中俊行, 谷川孝彦, マクロファージと線維芽細胞の活性に及ぼすオルトケイ酸と亜セレン酸の影響, *医学と生物学*, **123**, 245-249, 1991.
- 51) 谷川孝彦, 高山寿雄, 木村元喜: SV 40による株化, 新生化学実験講座18 細胞培養技術(日本生化学会編) pp 244-249, 1990.
- 52) 田中俊行, 林 康久, マウス tsA 640 - トランスフォームドマクロファージに対するオルトケイ酸と亜セレン酸の細胞毒性の比較, *Biomed Res Trace Elements*, **3**(2), 187-188, 1992.
- 53) Ingri N: *Biochemistry of Silicon and Related Problems*, edited by Bendz G and Lindqvist I, pp 3-51, Plenum Press, New York and London, 1978.
- 54) Carlisle EM, Silicon: A Possible Factor in Bone Calcification, *Science*, **167**, 279-280, 1970.
- 55) Carlisle EM, A Silicon Requirement for Normal Skull Formation, *J Nutr*, **110**, 352-359, 1980.
- 56) Carlisle EM, Silicon and Siliceous Structures in Biological Systems, edited by Simpson TL and Volcani BE, pp 69-94, Springer-Verlag, New York, 1981.
- 57) 田中俊行, ケイ素と哺乳動物, 鳥大医短部研報, **9**, 1-6, 1985.
- 58) 高橋正侑, 菊永茂司, ミネラルの栄養学的評価—銅, モリブデン, マンガン, ケイ素—, *栄養学雑誌*, **46**, 3-13, 1988.
- 59) 高橋正侑, 菊永茂司, 有森三和子, ミネラルの栄養学的評価(V) —ケイ素—, ノートルダム清心女子大学紀要, **11**, 47-52, 1987.
- 60) Carlisle EM, Biochemical and Morphological Changes Associated with Long Bone Abnormalities in Silicon Deficiency, *J Nutr*, **10**, 1046-1056, 1980.
- 61) Schwarz K, Ricci BA, Punsar S and Karvonen MJ, *The Lancet*, **1**, 538-539, 1977.
- 62) Loeper J, Loeper J and Fragny M: *Biochemistry of Silicon and Related Problems*, edited by Bendz G and Lindqvist I, pp 281-295, Plenum Press, New York and London, 1978.
- 63) Nakashima Y, Kuroiwa A and Nakamura M, Silicon Contents in Normal, Fatty Streaks and Atheroma of Human Aortic Intima: Its Relationship with Glycosaminoglycans, *Br J exp Path*, **66**, 123-127, 1985.
- 64) 豊島 滋, 福島紘司, 藤田晴久, 桜井敏晴, 杉本喜憲, 八木紀江, 富岡晴代, 福間真理子, 瀬戸淑子, 篠原紀夫, 山本 靖, 伊藤光一, 有機シリコン化合物の抗腫瘍性(I) 29の有機シリコン化合物の抗腫瘍活性に関する第一次スクリーニングテスト, *癌と化学療法*, **7**, 1942-1951, 1980.
- 65) 豊島 滋, 福島紘司, 瀬戸淑子, 桜井敏晴, 杉本喜憲, 八木紀江, 篠原紀夫, 山本 靖, 伊藤光一, 有機シリコン化合物の抗腫瘍性(II) 20の有機シリコン化合物の抗腫瘍活性に関する第一次スクリーニングテスト, *癌と化学療法*, **8**, 579-585, 1981.
- 66) 豊島 滋, 福島紘司, 桜井敏晴, 杉本喜憲, 大林優子, 瀬戸淑子, 篠原紀夫, 山本 靖, 伊藤光一, 有機シリコン化合物の抗腫瘍性(III) トリメチルシリルエチルチオエチルアミン(SDK-12A)の抗腫瘍性とその特徴について, *癌と化学療法*, **8**, 1130-1136, 1981.
- 67) 豊島 滋, 福島紘司, 桜井敏晴, 杉本喜憲, 佐藤 博, 田口宏子, 有機シリコン化合物の抗腫瘍

- 性(Ⅳ) SDK-50 と SDK-47 の抗腫瘍活性, 癌と化学療法, **9**, 225-229, 1982.
- 68) 藤田晴久, 福島紘司, 桜井敏晴, 福間真理子, 瀬戸淑子, 藤田知信, 伊藤光一, 篠原紀夫, 山本靖, 石原俊信, 有機ケイ素化合物の生理活性—がん化学療法的活性を中心に—, 日本化学会誌, **1990**, 566-574, 1990.
- 69) 桜井敏晴, 有機シリコン化合物の Lewis 肺 癌担癌 マウスにおける転移抑制効果について, CHEMOTHERAPY, **38**, 879-888, 1990.
- 70) Martin Grayson: カーク・オスマー化学大 辞典, pp 381-383, 丸善, 1988.
- 71) 和田 攻: 金属とヒト—エコトキシコロジーと 臨床—, p 173, 朝倉書店, 1985.
- 72) 田中俊行, 前田隆子, 林 康久, 今井昭二, 船 川一彦, 能勢隆之, 産後の母体血清, 母乳中のケ イ素含有量, 日本衛生学雑誌, **45**, 919-925, 1990.
- 73) 寺岡久之, 森井ふじ, 小林 純, 食品中に含ま れる24種の元素量および1日の元素摂取量につい て, 栄養と食糧, **34**, 221-239, 1981.
- 74) Dobbie JW and Smith MJB: Silicon bio- chemistry, edited by Evered D and O'Connor M, John Wiley and Sons, Chichester, pp 194-209, 1986.
- 75) Berlyne GM, Alder AJ, Ferran N, Bennett S and Holt J: Nephron, **43**, 5-9, 1986.
- 76) 田中俊行, 今井昭二, 林 康久, 健常人(18-21歳)のケイ素, カルシウム, マグネシウム およ びリンの尿中排泄, 医学と生物学, **119**, 211-214, 1989.

(受付 1993. 3. 1)

Summary

An outline of the nutritional essentiality and function of the elements in human body, was given as the basis of knowledge which I have acquired by now. I emphasized the following statements to be valuable. 1. Zinc (Zn) is one of the most important nutrients in the fetal, infant and child life, because of its strong association with cell division. 2. Selenium (Se) might be a preventive factor against carcinogenesis. 3. Silicon (Si) is strongly associated with bone formation through the collagen synthesis. Some types of organo-silicon compounds display cancer chemotherapeutic activities, as is worth noticing.