

拡張元素普存説と生体微量元素

原 口 紘 丞, 稲 垣 和 三, 保 倉 明 子, 松 浦 博 孝

(名古屋大・院工)

Extended All Present Theory of the Elements and Biological Trace Elements

Hiroki HARAGUCHI, Kazumi INAGAKI, Akiko HOKURA and Hirotaka MATSUURA

Department of Applied Chemistry, Graduate School of Engineering, Nagoya University,

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-0083

In 1936, Ida Noddack proposed a hypothesis called "All Present Theory of the Elements", in which she predicted the presence of all elements in geological samples (minerals and rocks). Based on the Noddack's hypothesis, the present authors are proposing a new concept of "Extended All Present Theory of the Elements", which indicates that the All Present Theory should be extended to all the biological systems including human beings. In order to elucidate or prove the Extended All Present Theory of the Elements, the experimental results for the determination of all rare earth elements in human blood serum, and multi-element determination of major-to-ultratrace elements in black and green tea leaves were introduced together with the chemical speciation of trace elements in black-tea infusion. Finally, the correlation of elemental concentrations between human blood serum and seawater was discussed from the viewpoints of chemical and biological evolution of the life in seawater. It should be stressed here that the recent research for trace elements has been supported by the development of high-sensitive and multi-element analytical methods, especially ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry).

1. は じ め に

近年生体中の微量元素, すなわち生体微量元素に関する関心が高まり, 多方面の研究者による研究が新しい研究領域として進展している^{1,2)}。このことは, 公害問題や労働災害における有害元素に関する研究に加えて, 微量元素がヒトの健康や病気に深く関与していることが, ミネラル成分という概念から特定の元素の問題として解明されつつあるためである。このような生体微量元素の研究は, 一方では分析技術の進歩とも深く関わりがある。すなわち, 高感度微量分析法の発展と分析装置の普及が, この研究領域の発展を支えている³⁾。分析化学においては, 1960年代の「ppm (10^{-6} g/ml) の化学」から現在は「ppt (10^{-12} g/ml) の化学」へと進歩し, かつ30~50元素の多元素同時分析法が確立されつつある。

本稿では、このような分析化学的側面から生体微量元素の研究に関する最近の進歩についてまとめる。

2. 元素普存説と拡張元素普存説

1930年代初め頃までには、蛍光分析法、発光分光分析法（アークおよびスパーク励起源）、X線分析法などの微量分析法が開発され、種々の試料中の主成分から微量成分の元素分析に盛んに応用され始めていた。その中でも、地球化学の分野では元素の起源、存在、分布、そして資源探査などの研究目的から岩石、鉱物中の元素分析が精力的に行われた。その結果、V. M. Goldschmidt (1888-1947) による「元素の地球化学的分配法則」、V. I. Vernadskii (1863-1945) による“生物圏 (biosphere)”や“生物地球化学”、F. W. Clarke (1847-1931) による“クラーク数 (地殻における元素の平均存在度)”，などが提唱され、学問の体系化がなされた⁴⁾。

このような時代において、ドイツの地球化学者であった Ida Noddack は1936年に「元素普存説 (“All Present Theory of the Elements” または “Omni-presence of the Elements”）」を提唱した⁵⁾。Noddack は多数の鉱物、岩石の分析の経験から、「地球上のすべての鉱物や岩石中には周期表中に知られているすべての (安定同位体) 元素が存在する」とする元素普存説を提唱したのである。彼女は閃亜鉛鉱中に、当時知られていた89元素のうちの16元素を除くすべての元素の存在を報告したが、それ以外の元素は存在しないのではなく、当時の分析技術では検出できないだけであり、将来科学技術や分析技術が進歩すれば、地球上に個別に存在する鉱物や岩石中にはすべての元素が検出できるはずであるとする仮説が元素普存説である。この説は先見性をもった予言的仮説として地球化学者の間では語り継がれてきた。

さて、Noddack による元素普存説の提唱から60年余りが経過した。その間に多くの分析技術が開発され、分析法の高感度が実現されてきたが、地球化学の分野でも元素の存在に関する体系的な研究例は少ないようである。しかし、最近10年間ほど著者らは岩石、鉱物、堆積物、大気粉塵、天然水（海水、湖水）、植物、生体など種々の試料の多元素分析を手がけてきた。その結果と経験から原口が最近提唱しているのが、「拡張元素普存説 (Extended All Present Theory of the Elements)」である。拡張元素普存説とは、地球上のすべての個別の物質中にすべての元素が存在するとした元素普存説を、人間を含む生物（動物、植物、およびそれらの器官、臓器）にまで拡張して考えるべきであるとする説である。このことは、岩石、鉱物中にすべての元素が存在するとすれば、それらが風化、溶解して溶出した元素が河川や湖沼、池を通して土壌に入り、そこで生育した植物にもすべての元素が含まれ、そしてそれを食べる動物にもすべての元素が含まれるはずである。人間（ヒト）は水を飲み、植物、動物も食べるのであるから、ヒトにもすべての元素が含まれると考えるのは当然のことであろう。

3. ヒト血清中希土類元素の定量

Fig. 1 は、ヒトの血清および血漿についてこれまで種々の分析法 [原子吸光分析法 (AAS), 誘導結合プラズマ発光分析法 (ICP-AES), 誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS), 中性子放射化分析法 (NAA) など] によって定量または検出したと報告されている元素を周期表上にまとめたものである。定量され

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac**																
		*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
M	Element determined				M	Element detected				M	Essential trace element							

Fig. 1 The elements in human blood serum and plasma, which have been determined or detected by various analytical methods such as AAS, NAA, ICP-AES, and ICP-MS.

The elements such as H, C, N, O, Na, Mg, P, S, K, Ca and Cl are known as essential major and minor elements.

た元素の値が正しいかどうかについては疑問や多くの議論があるところであるが、Fig. 1 から分かるように、多くの元素が血清や血漿中について定量または検出されている。その中で、希土類元素（La を含めたランタノイド元素）は La と Ce の 2 元素が定量され、4 元素が検出されているだけで、残りの 8 元素は未検出である（Pm は放射性元素である）。

現在著者は、拡張元素普存説の証明として、血清の全元素分析に挑戦している。その一例として、Fig. 2 に示した分析操作によって、ICP-MS による全希土類元素の定量を行った例⁶⁻⁸⁾を紹介する。

ヒト血清試料は約 8ml を硝酸と過塩素酸を用いて加熱分解を行い、1M 硝酸 100ml に溶解した。この分解溶液 90ml を用いて、希土類元素をキレート樹脂（Chelex100）を利用して濃縮する操作が Fig. 2 のフロー図である。最終的には 2ml の 0.1M 硝酸溶液としたので、最初の血清試料 8ml からすると計算上は 4 倍濃縮を行って、ICP-MS 測定に供した。血清試料に希土類元素を添加して、上記の加熱分解および濃縮を行った時の回収率は、すべての希土類元素に対して 95～100% であり、ICP-MS による分析の前処理操作としては推奨できる方法であった。

Table 1 には、男子学生 5 名から採取した血清中の希土類元素の定量値をまとめる⁸⁾。Table 1 から分かるように、最小値 Eu の約 1ppt (1ppt = 1×10^{-12} g/ml) から最大値 Ce の約 200ppt の濃度範囲内ですべての希土類元素が検出された。5 名の分析値についてみると、軽い希土類元素（La ～ Gd）についてはほぼ同じ濃度レベルにあり、重い希土類元素（Tb ～ Lu）でも 2 倍以内の範囲であり、それほど大きな濃度変動がないことが明らかとなった。

最近希土類元素はセラミックスを中心とする高機能性材料への利用、MRI（磁気画像診断装置）の造影剤としての使用など、その使用量が急激に増加している。また、中国などでは農業用の肥料として散布され、穀物の多収穫が得られるとの報告もある。このような動向は、希土類元素の環境への放出量、

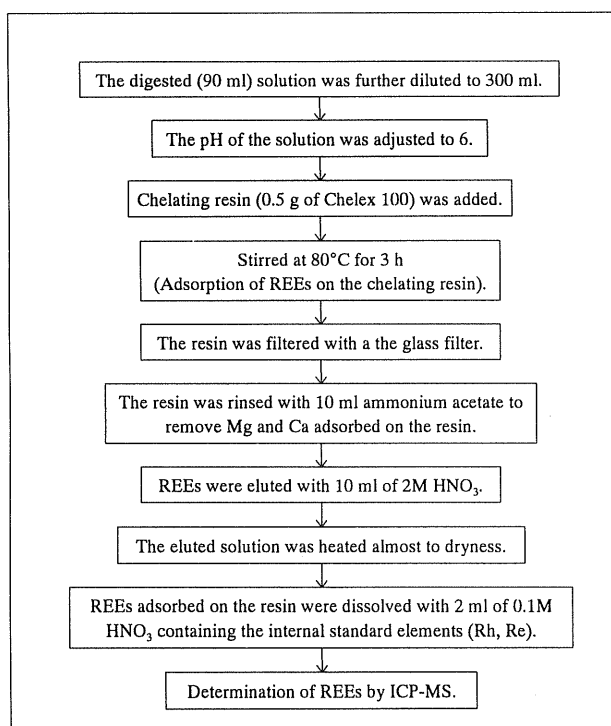


Fig. 2 Chelating resin preconcentration procedure for the determination of rare earth elements in human blood serum by ICP-MS.

Table 1. Analytical results for rare earth elements in human blood serum determined by ICP-MS after chelating resin preconcentration^{a)}

Element	unit: pg/ml (ppt)					Detection Limit
	A	B	C	D	E	
La	73.2	58.6	66.8	56.0	59.0	0.1
Ce	235	187	235	195	216	0.2
Pr	13.5	10.0	11.4	9.6	10.9	0.04
Nd	39.8	31.6	35.4	28.4	33.5	0.1
Sm	7.4	4.6	6.2	5.1	5.5	0.2
Eu	1.1	0.7	1.0	0.7	0.7	0.05
Gd	8.6	6.0	7.0	5.8	8.7	0.2
Tb	1.6	1.1	1.1	1.2	1.4	0.02
Dy	11.2	8.9	8.8	8.8	10.3	0.1
Ho	3.4	2.2	2.1	2.3	2.8	0.04
Er	12.4	8.3	7.8	8.7	10.3	0.04
Tm	2.3	1.3	1.4	1.6	1.8	0.03
Yb	17.8	11.3	10.4	11.4	15.4	0.1
Lu	3.1	2.1	1.9	2.1	3.1	0.03

^{a)} A ~ E indicate individual male students who donated the blood samples.

すなわち環境中の存在量が増大していることを示している。このことはさらに、我々人間の希土類元素に対する環境曝露量および食物を通しての摂取量も増大する結果を招くであろう。現在希土類元素の生体内における生化学ないし生理学的役割や作用は明らかにされていないが、Table 1 に示したヒト血清中の希土類元素濃度は現時点における人体中のバックグラウンド値として注目すべきものと考えられる。さらに、1ppt レベルの希土類元素がヒト血清中に14元素すべて検出されたことは、生体中にもすべての元素が存在するとする拡張元素普存説の一状況証拠としても興味あるデータである。

Fig. 3 には、Table 1 の希土類元素濃度の平均値を使って求めた“希土パターン”を、外洋海水⁹⁾ および沿岸海水（名古屋港沖）¹⁰⁾ の場合とともに示す。希土パターンは地球化学において、岩石や鉱物の生因や起源、また宇宙や地球における元素の分布や循環を探るためによく用いられる希土類元素の相対的濃度分布パターンである。Fig. 3 では、血清、外洋海水、沿岸海水の希土類元素濃度を石鉄隕石（chondrite）中の濃度で規格した値を縦軸にプロットして、相対的濃度分布パターンを示してある。注目すべきことは、Ce と Eu で異常が見られるが、全体的には V 字型の類似したパターンとなっていることである。この Ce と Eu の異常は岩石、鉱物、海水などでもよく観察されることである。すなわち、Ce と Eu を除く希土類元素はすべて酸化数が +3 価であるのに対して、Ce は +3 価と +4 価、Eu は +3 価と +2 価を取り得るために、存在環境の酸化還元状態によって Ce と Eu の存在量が異なるのである。

生命の誕生は約35億年前の海であったと考えられる。それ以来化学進化、生物進化を通じて現在の地球の生物系が存在している。生命の誕生が海であったとする説の中に、海水とヒト血液中の塩類や微量

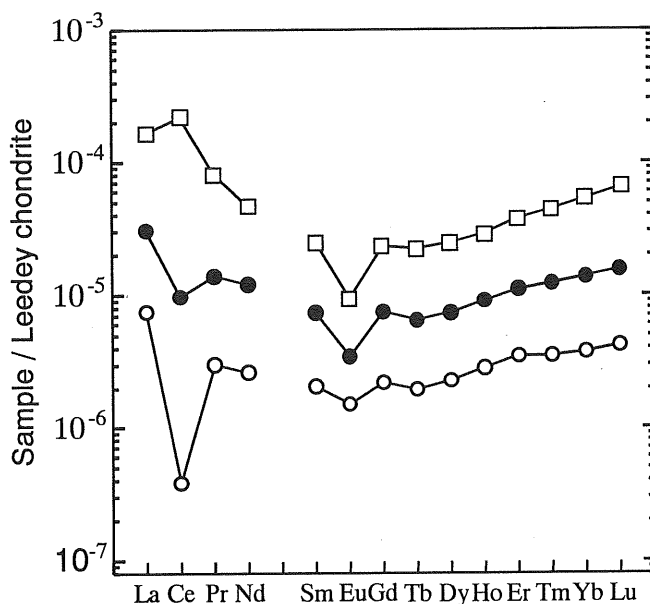


Fig. 3 Concentration distribution patterns of rare earth elements in human serum, coastal seawater and open seawater.

—□— Human serum —●— Coastal seawater —○— Open seawater

元素の組成や濃度が類似していることが挙げられる。Fig. 3の希土パターンで、ヒト血清と海水では濃度レベルは異なるが、パターンが類似していることは、生命の海洋誕生説を支持する証拠とも考えられる。すなわち、ヒト血清は海水中の希土類元素濃度を恒常的に保持し、ある生理的機能を維持しているのかもしれない。このような希土類元素のヒト血清（血液）中の存在と生理学的機能に関しては、今後の研究の進展が大いに期待される。

4. 植物中微量元素の分布と化学形態別分析

植物試料についても多くの元素の存在と、その必須性や有害性の問題が知られている¹¹⁾。しかしながら、これまでの研究ではある種の特定元素に関する植物生理学的研究、ないしは成育や収穫との関連に関する研究が主であり、植物試料の多元素分析と、その結果を用いた多元素相互作用ないしは相関解析の研究例は少ない。また、最近では、植物を含む生体試料についても、その中に存在する微量元素の化学的存在形態に関する研究は“chemical speciation”, “elemental speciation”と呼ばれ、分析化学の分野の先端研究課題となっている¹²⁾。なお、chemical speciation は日本語では“化学形態別分析”と呼ばれる。著者の研究室では、多種類の植物試料の多元素分析と化学形態別分析も行っているが、本報では茶葉試料（紅茶および緑茶）の研究例を紹介する¹³⁾。

茶葉試料の場合、緑茶および紅茶のいずれについても硝酸を用いる酸分解後、フッ化水素酸処理を行って植物中に存在するケイ酸質の完全分解を行うことが、とくに酸化物が安定な元素について正確な分析値を得るために必須の操作である¹⁴⁾。フッ化水素酸処理後は、溶液を蒸発乾固してフッ化水素を揮発除去し、残さを1M硝酸に溶解して測定溶液とした。そしてICP-AESとICP-MSを用いて、主成分から超微量成分に相当する約40元素の定量を行った。Fig. 4には、紅茶と緑茶について上記の方法によって得られた定量値をプロットした図を示す。Kの約2%からTmの約2ppb (10^{-9} g/g乾燥重量当たり)の約40元素のデータが得られ、多様な元素が広い濃度範囲で含まれていることが分かる。紅茶と緑茶では希土類元素等で若干の差があるが、元素存在量としてはそれほど大きな差は見られなかった。

茶葉はカテキンなどのポリフェノール類化合物を含み、抗酸化作用をもつ食品として注目されている。茶葉の抗酸化作用には金属イオンの関与も示唆されているので、Fig. 4に示す多元素のデータは、抗酸化作用との関連でも参考になると思われる。しかし、このような生理活性との関連を議論するには、さらに微量元素の存在形態を解明することが望ましい。そこで、茶試料について前述の化学形態別分析をSEC（サイズ排除クロマトグラフィー）／UV吸収検出／ICP-MS複合分析システムを用いて行った。この複合分析システムはこれまで著者らが天然水中の微量元素の化学形態別分析に応用してきたものとはほぼ同じものである¹⁵⁾のでここでは詳細な記述はしないが、本研究で用いたSECカラムは分子量範囲3,000～70,000のサイズ分画が可能であり、SECで分画された試料はon-lineでUV吸収による有機物の検出、引き続きICP-MSによる元素選択性検出を行って、それぞれの検出クロマトグラムを同時に測定することができる。

Fig. 5には、SEC/UV/ICP-MS複合分析システムで測定した紅茶抽出液の有機物および微量元素のクロマトグラムを示す。分析に用いた紅茶抽出液は、粉末状紅茶試料2gを100mlの熱水に入れ、5分間

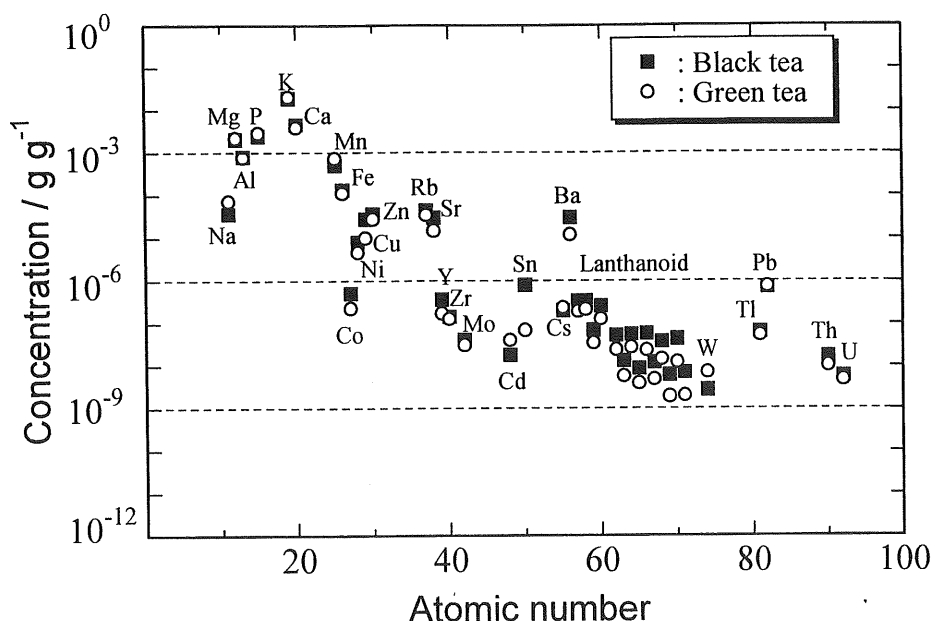


Fig. 4 Total concentrations for diverse elements in tea leaves as dry weight basis.

煮沸し、その後メンブランフィルター（孔径 $0.45\mu\text{m}$ ）でろ過して得られた溶液である。抽出液試料 $200\mu\text{l}$ をSECカラムに注入し、移動相には1M酢酸アンモニウム（pH 5.8）を用いた。Fig. 5(a)のUV検出クロマトグラムには多くの吸収ピークが観測されているが、茶葉中のカフェインは、最大吸収を示す保持容量 24ml のピークとして検出された。一方、Fig. 5(b)に示されるICP-MSおよびICP-AESで元素選択的に検出された微量元素クロマトグラムではBa, Y, Al, Mn, Kの例を示した。これらの元素のうちBaは保持容量約 8ml と 12ml の位置にピークが観測され、分子量 $70,000$ および $25,000$ 程度の有機物と結合した化学種の存在が示唆された。またFeとCuはYと同じ保持容量で検出された。現在のところ、このような元素の化学形態、とくに金属元素が結合した有機物はほとんど解明されていないが、植物中においても微量元素は、高分子態有機化合物と金属錯体を形成して存在するものと考えられる。抗酸化作用との関連として、これら微量元素とカテキンなどのポリフェノール類との相互作用も検討中である。

5. 海と微量元素

3節で、ヒト血清と海水中的希土類元素の濃度パターンから、生命誕生の場が海洋であることの可能性について述べた。海水中的微量元素については近年精力的な研究が行われ、ほとんどすべての元素についてその濃度レベルと外洋（太平洋や大西洋）における深度分布パターンが明らかにされつつある¹⁶⁾。このような研究は、そのほとんどが地球化学、海洋化学的観点から海洋における元素の分布と循環、海洋表層における生物活動、また海水循環メカニズム等に関連する研究課題として行われている。

一方、著者らは海水およびヒト血清に含まれる元素の多元素分析を行い、その比較から海洋における

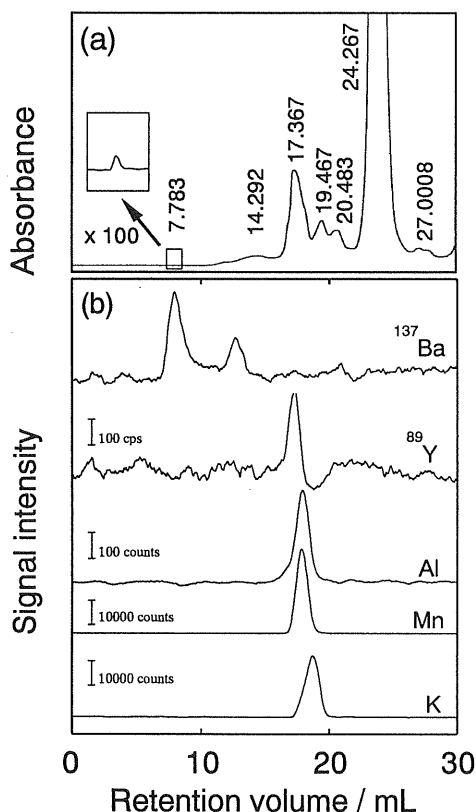


Fig. 5 Chromatograms of black-tea infusions obtained with the combination system. (a): UV detection at 260 nm (b): ICP-MS (Ba, Y) and ICP-AES (Al, Mn, K) detections. column: Superdex 75 HR10/30 (Pharmacia), mobile phase: 1 M ammonium acetate (pH 5.8), flow rate: 1.0 ml/min, sample volume: 200 μ l.

生命進化の謎を解くことができないかとの観点から現在研究を進めている。Fig. 6 にはその一例として、これまで得られた海水とヒト血清中の元素濃度の相関図を示す。

Fig. 6 に示した実線は相関直線であり、線上より上にある元素はヒト血清中においてより高濃度であり、線上より下にある元素は海水中においてより高濃度であることを示す。Fig. 6 においては、それぞれの元素を、元素の地球化学的分配則による分類に従い、(a)親鉄元素 (○)、(b)親石元素 (●)、(c)親銅元素 (□)、(d)親気元素に分け、それぞれの記号で相当する濃度位置にプロットしたものを示してある。このような元素の分類の地球化学的な意味ないし定義は次の通りである。

(a) 親鉄元素 (siderophile elements) :

地球中心の核部の主成分となっている Fe, Co, Ni およびこの核部に濃縮している元素。単体として存在または酸素との親和性の大きい元素群である。

(b) 親石元素 (lithophile elements) :

地球表層の地殻部においてケイ酸塩岩石、およびその風化生成物である粘土の構成成分、および岩石・

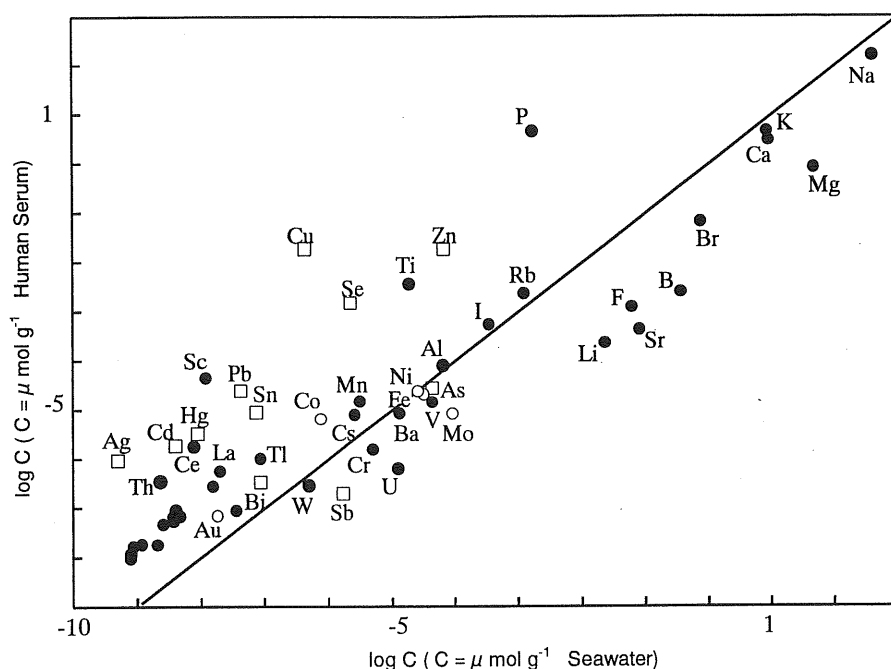


Fig. 6 Correlation between the concentrations of elements in human blood serum and in seawater.

粘土中に濃縮している元素。酸素と親和性の大きい元素群である。

(c) 親銅元素 (calchophile elements) :

地殻中で硫化物鉱物として産出される元素, および硫化物鉱物中に濃縮している元素。イオウとの親和性の大きい元素群である。

(d) 親気元素 (atmosphile elements) :

揮発性が高く, 大気中に原子または分子として存在する元素。H, C, N, O および希ガスである。Fig. 6 には示していない。

上記(a)~(d)の分類のほか, 「生物の主な構成元素, および生物中で生理学的役割をする微量元素」を親生元素 (biophile elements) として分類することもある。この親生元素は, 現在では必須常量元素および必須微量元素に相当する元素群とほぼ一致している。

Fig. 6 のヒト血清と海水中の元素の濃度分布相関を, 上記(a)~(c)に分類される元素群に着目して考察すると興味ある事実が見い出される。海水中の常量成分 (主成分100~1%, 少量成分1~0.01%) であるNa, K, Caはヒト血清中でも高濃度であり, ほぼよい相関を示し, その他のアルカリ元素であるRb, Csも両者においてよい相関がある。しかし, Mg, B, F, Sr, Liは海水中に高濃度となっている。その他の元素については, 一般的に酸素との親和性が大きい親鉄元素および親石元素に分類される元素群はよい相関を示している。このことは, これらの元素はヒト血清と海水中でほぼ同じ濃度で存在して

いることを示すものである。このように、親鉄元素、親石元素がよい相関を示すのに対して、注目すべきことは、親銅元素である Zn, Cu, Se, Cd, Pb, Hg, Ag などはヒト血清中でかなり高濃度であることである。親銅元素に分類される As, Sb は例外で海水中濃度とほぼ同じレベルとなっている。前述のように、親銅元素はイオウと親和性の大きい元素群である。そして、親銅元素である Zn, Cu, Se は生体必須微量元素として知られ、生体内の生理作用と深く関係している。一方、Cd, Hg, Pb は生体において有害性が高く、イタイタイ病、水俣病、鉛中毒症などの公害問題の原因となった。しかし、これらの必須元素、有害元素として知られる元素がヒト血清中に高濃度となっていることは、これらの元素の生体濃縮係数が大きいことを示す。このような生体濃縮が大きいことは、イオウとの親和性が大きいことに由来すると考えられ、タンパク質中でイオウを含むアミノ酸であるシステインとの結合によるものと推測される。

化学において Lewis の酸塩基説によると、金属イオンが無機イオンや有機分子を配位子として錯体を生成する場合、金属イオンは酸、配位子は塩基と定義される。この場合は配位子の配位原子上に存在する非共有電子対の受容体である金属イオンが酸、電子対供与体である配位子が塩基と考えるのである。この Lewis 説は一般的な酸塩基の概念にまで拡張することのできる考え方である。

さらに、金属イオンが関与して錯体や化合物を生成する場合の性質を理解する上で、Pearson によって提唱された“Hard and Soft Acids and Bases Theory”（硬い酸塩基・軟らかい酸塩基理論）がある。軟らかい酸とは、 S^{2-} , I^- , CO , CN^- などの分極しやすい軟らかい塩基と錯体を生成しやすい金属イオンで、Zn, Cu, Cd, Ag, Hg など前述の親銅元素に分類される元素群である。一方、硬い酸とは、 OH^- , F^- , Cl^- , NH_3 , SO_4^{2-} などの分極しにくい硬い塩基と錯体を生成する金属イオンで、Mg, Al, Cr, Si などの親石元素に分類される元素群であり、Fe, Ni, Co の親鉄元素も硬い酸に分類される。また、上記の硬い酸・塩基は酸素雰囲気下、すなわち好気性の条件で安定な化合物ないしイオンである。一方、軟らかい酸・塩基は還元雰囲気下、すなわち嫌気性の条件で安定に存在するという化学的性質を持つ。

金属イオンや配位子に関する上記の化学的性質や考え方をもとに、Fig. 6 のヒト血清と海水中の元素の分布を考察すると、興味ある結論が導かれる。Fig. 6 において、軟らかい酸に相当する親銅元素群がヒト血清中に濃縮されていることは、ヒト血清は還元雰囲気下にあり、軟らかい塩基であるシステインの SH 基と軟らかい酸である Zn, Cu, Cd などの金属イオンの結合能力が高く維持されていることを示すものである。ヒト血清中の希土類元素の項でも述べたが、ヒト血清中では海水中の元素濃度を反映する恒常性を維持する機構が保たれている可能性がある。さらに、軟らかい金属イオンと軟らかい配位子（アミノ酸、タンパク質を含む）が血清中に高濃度であることは、生命維持に本質的役割を果たす血清中における生体物質の合成と、それに関与する金属イオンの選択が、地球上に酸素がなかった時代、すなわち30～35億年前の原始海洋中で起こったものであることを示唆する。そして、25億年前海洋で光合成による酸素の合成が始まった後は、好气的条件を形成する酸素と、嫌气的条件によって維持されるイオウ（ S^{2-} や $-SH$ ）との競合反応によって、生命の進化が起きてきたと考えるのはいかがであろうか。

論理の飛躍がかなりあるかもしれないが、ヒト血清と海水中の多元素分析結果から、その存在量の相関と元素の化学的性質を考慮すると、微量元素が海洋における生命の誕生とその後の化学進化や生物進

化に深く関わってきたことを示唆する推論が得られる。今後更に研究が進展し、生体微量元素の生命における本質的役割が解明されることを大いに期待したい。本稿の考察がそのような研究展開の一助となれば幸いである。

6. お わ り に

最近の分析化学における微量分析法の動向、並びにヒト血清中希土類元素の濃度測定、植物中微量元素の化学形態別分析、海洋における微量元素の分布などの研究についてまとめた。近年の微量分析研究の特徴は主成分から超微量成分までの多元素分析の実現であり、ICP-AES, ICP-MSを併用することによって30～50元素の定量も比較的容易にできるようになりつつある。また、微量元素の化学形態別分析も重要な研究課題として世界的に注目されており、SECとICP-MSの結合（複合）分析システムを利用することにより、微量金属が高分子態有機化合物と結合した形で存在することが明らかにされつつある。

さらに、著者が提唱している「拡張元素普存説」も今後注目され、研究が進展することを期待している。すなわち、ヒトを含めてすべての生物（動物、植物、微生物）中にもすべての元素が存在していることを前提として、生体微量元素に関する研究がその存在量だけでなく、構造や機能を含めた生体物質の研究として発展することを願う次第である。このことは、我々の棲む地球環境の理解を深めるだけでなく、ヒトの健康増進や病気の診断・治療にも大いに役立つものと考えられる。

（謝辞）第15回微量栄養素研究会で招待講演の機会を与えて下さった大会会頭 桜井 弘教授（京都薬科大学）に心より謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 千葉百子, 鈴木和夫編 (1996) 健康と元素, 南山堂, 東京
- 2) 桜井 弘 (1996) 金属は人体になぜ必要か, 講談社, 東京
- 3) 原口紘丞, 寺前紀夫, 古田直紀, 猿渡英之訳 (1996) 微量元素分析の実際, 丸善, 東京
- 4) 半谷高久編著 (1988) 地球化学入門, 丸善, 東京: pp.1-12
- 5) Noddack, I. (1936) *Anquewandte Chem.* **47**: 835
- 6) Fujimori, E., Y. Tomosue, and H. Haraguchi (1996) *Tohoku J. Exp. Med.* **178**: 63
- 7) Inagaki, K., and H. Haraguchi, (1997) *Chem. Lett.* **1997**: 775
- 8) Inagaki, K., E. Fujimori, H. Haraguchi, and S. Takeuchi (1997) *Biomed. Res. Trace Elements* **8**: 161
- 9) Zhang, J. and Y. Nozaki (1996) *Geochem. Cosmochim. Acta* **60**: 4631
- 10) Sawatari, H., T. Toda, T. Saizuka, C. Kimata, A. Itoh, and H. Haraguchi (1995) *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **68**: 3065
- 11) 茅野充男, 齋藤寛編 (1988) 重金属と生物, 博友社, 東京
- 12) Donard, O. F. X., J. A. Caruso (1998) *Spectrochimica Acta Part B* **53**: 157
- 13) Hokura, A., F. Katsuki, H. Matsuura, and H. Haraguchi (1998) "International Trace Analysis Sympo-

sium '98", July 31-August 3, Sanjo Hall, The University of Tokyo, Tokyo

- 14) 勝木富美恵, 保倉明子, 岩畑大悟, 生熊崇人, 小栗佐知子, 原口紘丞 (1998) 分析化学 **47**: 印刷中
- 15) Haraguchi, H., A. Itoh, C. Kimata, and H. Miwa (1998) Analyst **123**: 773
- 16) 野崎義行 (1992) 地球化学 **26**: 25