

大気と海洋はいつできたか

秋 山 雅 彦*

Development of the Earth's Atmosphere and Oceans

Masahiko AKIYAMA

Abstract

The primordial atmosphere on the Earth originated from the secondary expulsion from the interior of the Earth. This hypothesis comes from the high deficiency factors of rare gases. An argon isotope ratio of 295.5 in the present atmosphere suggests that degassing of more than 85 percent of the volatile matter present on the Earth might have occurred within 0.5 billion years after the birth of the Earth. This is known as the catastrophic early degassing hypothesis.

There appear, however, some doubts on this hypothesis from the study of Archean geology. Extremely low abundance of carbonate rocks in the Archean, constant $\delta^{13}\text{C}$ difference between the carbonate and organic carbons throughout geologic time and other geological evidences seem to support the intermittent degassing hypothesis (Akiyama, 1984; 1985b).

Determination of an argon isotope ratio of the Archean atmospheric gas enclosed in the Iyengra quartzite in the Siberian Platform is expected as one of the possible methods for the solution of this problem.

はじめに

1983年6月5日からの5日間、大久保雅弘先生の招きを受け、島根大学理学部地質学教室で講義をする機会を与えられた。内容は有機地球化学と古生化学を柱にしたものだったが、当時は大気と海洋の起源とその発展史にいくつかの疑問をもちはじめていたの、それをまとめる上で講義の機会を使わせていただいた。そのことが契機となって断続脱ガスという考えをまとめることができた。

地球の大気と海洋は40億年前にはほぼ完成したとするカタストロフィック初期脱ガス説 (Catastrophic early degassing) に疑問をなげかけ、その解決法として提唱したのが断続脱ガス説 (Intermittent degassing)

である。

しかし、脱ガスの歴史については具体的にのべることができなかつた。その後、先カンブリア時代の地史について調べるなかで、いくつかの事実が明らかになってきた。この小論では、大気と海洋の発展にまつわる先カンブリア時代の地史の一端を紹介し、諸賢のご批判をえたい。あわせて、大久保雅弘先生のご退官に際して、永年にわたってお世話になったことへの謝意を表わすことになれば幸いである。

カタストロフィック初期脱ガス説

地球の大気が原始星雲ガスの生きのこりではなく、地球内部からの脱ガスによって形成されたとする考えは、H. Brown (1952) によって確立された。そして、現在の大气中にふくまれる希ガスと太陽系の希ガスとの比較から、二次的脱ガスが提唱された。

元素の存在度は Si を基準にとり、Si 原子104個に

* 北海道大学理学部地質学鉱物学教室
(昭和58年度島根大学理学部非常勤講師)

第1表 地球と太陽系における元素の存在度と欠損係数 (Mason and Moore, 1982による)

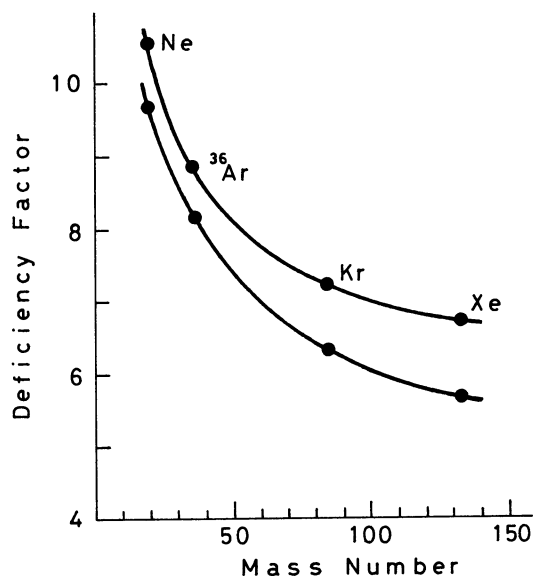
元素名	原子番号	各元素の存在度*		欠損係数 log (b/a)
		全地球 (a)	太陽系 (b)	
H	1	84	2.2×10^8	6.4
He	2	3.5×10^{-7}	1.4×10^7	15
C	6	71	94,000	3.1
N	7	0.21	29,000	5.1
O	8	35,000	280,000	0.9
F	9	2.7	8	0.5
Ne	10	1.2×10^{-6}	8,300	9.8
Na	11	460	600	0.1
Mg	12	8,900	10,600	0.1
Al	13	940	850	0
Si	14	10,000	10,000	0
P	15	100	130	0.1
S	16	1,000	5,020	0.7
Cl	17	32	57	0.3
Ar	18	5.9×10^{-4}	220	5.6
Kr	36	6×10^{-8}	0.87	7.2
Xe	54	5×10^{-9}	0.015	6.5

対する原子数で表わされる(表1). 各元素の相対量について、太陽系の値を地球の値でわったものの対数値が欠損係数 (Deficiency factor) とよばれている。He, Ne, Ar, Kr, Xeなどの希ガスは大きな欠損係数値をもっている。つまり、それらの希ガスは地球大気での失なわれ方が大きかったことを示している。

このことが示されている図1では、希ガスの欠損係数が大きいこととともに、質量数の小さなガスほど欠損係数が大きいことも示されている。2つの曲線のうち、上のは大気中の希ガスだけが、また、下の曲線は地球内部に含まれているガスを加えた結果が示されている。Arについては ^{36}Ar とされていることの原因は、Arガスの主体を占める ^{40}Ar が ^{40}K の壊変によってつくられたガスであるため、 ^{40}Ar を除外して考えていることによる。

二次的脱ガス説は多くの支持をえてきたが、脱ガスがいつ、どのようにして生じたかについては答えていない。

この問題への解答はArの同位体比の研究からえられている。 ^{36}Ar と ^{40}Ar はともに安定な同位体であるが、 ^{40}Ar は ^{40}K の電子捕獲によって生成してくるため、地質時代の経過とともにその量は増加する。地球



第1図 希ガスの欠損係数

上のグラフは大気中の希ガスに限定した場合、下のグラフは地球内部に含まれる希ガスも加えた場合 (Brown, 1952による)

の誕生した46億年前には ^{40}Ar は少なく $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値は 10^{-4} であった、と推定されている。

現在の地球大気中の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値は295.5で、このような大きな値をとるのは ^{40}K の壊変によって生成した ^{40}Ar が地球内部から放出されてきたことで説明されている。地球内部に含まれる ^{40}Ar の量は、地質時代が新しくなるにつれ大きくなってきたはずである。地球をつくった源物質であるとされるコンドライト質イン石の研究から、二次的脱ガスが最近の地質時代に起きたとすると、Ar同位体比は1300ぐらいと推定されている (小嶋, 齊藤, 1978)。したがって、現在の地球大気の295.5という値を満足させるためには、いつどのぐらいの量の脱ガスがおきたか、理論的に決めることができる。

このような考えかたに基づいて、地球誕生後の5億年以内に85%以上のアルゴンが放出された、と結論されている (小嶋, 1978)。Arは地球大気の0.93%を占めているにすぎないが、地球をとりまく他の揮発性物質 (N_2 , CO_2 , H_2O) がArとはちがう機構でもたらされたと考えられる理由は全くない。したがって、大気も海もその大部分が今から40億年前にすでにつくられていたことになる。

しかし、酸素分子は例外で、生物の光合成によって

* Siを10,000としたときの各元素の相対比

二酸化炭素から新たに加えられたガスであるとされている。

一次大気散逸のモデル

Ar の同位体比をもとにくみだてられたカタストロフィック初期脱ガス説は定説になっているかの感があるが、この仮説には重大な前提条件のあることを忘れてはならない。それは、二次的脱ガスがおこる以前の地球には一次大気はまったく存在しなかったとしていることである。

一次大気の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値は 10^{-4} という小さな値であるので、もし一次大気が残存していたとすれば、二次大気の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値は一次大気によって薄められて、小さくなったと考えることができよう。

二次的脱ガスが顕生代に入ってから起きたとすれば、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ は 1300 くらい値をとるとされている。このような値をもった二次大気のアルゴン同位体値が残存一次大気によって、現在の大気の実測値 ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=295.5$) までさがったとすると、そのときに必要とされる一次大気残存量は次の式で計算される。

$$\frac{\text{(現在の大气中の } ^{40}\text{Ar 量)}}{\text{(現在の大气中の } ^{36}\text{Ar 量)} - \text{(一次大気残存 } ^{36}\text{Ar 量)}} = 1300$$

現在の大気中に含まれる ^{40}Ar と ^{36}Ar の量はそれぞれ $6.6 \times 10^{19}\text{g}$ 、 $2.2 \times 10^{17}\text{g}$ であるから、一次大気残存 ^{36}Ar 量は $1.7 \times 10^{17}\text{g}$ となる。一次大気の $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 値は 10^{-4} であるから、 $1.7 \times 10^{17}\text{g}$ という ^{36}Ar 量を Ar 量とみてよいことになる。

はたして、このような一次大気残存量を推定することが可能であろうか。

地球軌道付近における星雲密度が $5.7 \times 10^{-9}\text{cm}^{-3}$ のとき、原始地球にとらえられた原始大気量は 10^{26}g である。そして、星雲密度が 10^{-9}cm^{-3} であったとしても原始大気量は $3 \times 10^{26}\text{g}$ で大きくは変わらなかったという (中沢, 1978)。この原始大気は太陽系と同じ組成であったとすれば、Ar 量は $7 \times 10^{21}\text{g}$ となる。

その後、太陽からの放射が大きくなり、地球の温度が上昇するにともなって大気量は $4 \times 10^{20}\text{g}$ にまで激減したとされている (中沢, 1978)。Ar の減少率も全体値のそれに近いとすれば 10^{17}g 程度の ^{36}Ar が一次大気として原始地球に残されたことになる。

この値は私が指摘した ^{36}Ar の残存量 $1.7 \times 10^{17}\text{g}$ に近い値である。一次大気は零でなく、残存していた可能性も考えられるとすれば、カタストロフィック初期脱ガス説は根拠を失なうことになる。

始生代の地質と断続脱ガス説

地球上で発見されている最古の岩石はグリーンランドのイスアに分布する堆積岩・変成岩・片麻岩などで、その年代は 38 億年とされている。それらの地質系統が形成された地質年代を Isuan とし、始生代の最古の時期としている。かつては、始生代以前は先地質時代とされていたが、最近では Priscoan という年代区分が使われている。(Harland *et al.*, 1982)。この語はラテン語の *priscus* に由来し、英語の *previous* の意であるという。

Isuan に続く Swazian の堆積物は南アフリカの Swaziland 累層群がそのタイプとされ、オーストラリア・中国・ソビエトなどにこの時期の堆積岩が知られている。

カタストロフィック初期脱ガス説にしたがうと、40 億年前には 85% 以上の脱ガスがおこったとされていることから、当時はすでに現在の規模に匹敵するような海ができあがっていたことになる。同時に脱ガスした CO_2 は 40 気圧にあたる量であったと推定されている。このように大量の CO_2 が大気中に存在したとすれば、温室効果によって地表温度は 300°C をこえてしまった、と考えられる (秋山, 1984, Akiyama, 1985b)。

一般には、 CO_2 は海水にとけ、Ca, Mg などの金属元素と化合し炭酸塩となって沈殿したとされている。しかし、始生代の地質系統には炭酸塩岩はわずかしか見あたらないという不可思議な事実がある。

また、始生代の堆積物には粗粒の礫岩などは少なく、堆積速度も小さかったこと (Akiyama, 1985a) などから、始生代の地表は起伏が小さく平坦な地形であったと推定される。もし、当時の海は地表を一樣にとりまいたとすると、その深度は 2300 m もの深海を考えなければならないことになる。しかし、オーストラリア西部の Gorge Creek 層群の研究からわかるように、当時の堆積物はゆるやかな地形を後背地とする浅海に堆積したとされている。(Barley *et al.*, 1979)。

ここで、始生代の地質系統に炭酸塩岩が少ないという事実が始生代の地球全体に一般化できることを説明する必要にせまられる。

・Schidlowski (1978, 1982) は始生代から顕生代にかけての各地質時代の炭酸塩岩とその中に含まれている有機物を取りあげ、それらの炭素同位体組成から次のような事実を明らかにした。

(イ) 炭酸塩岩の炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は 0% で、有

機物のそれは平均値として -25% である。

(ロ) 始生代以降現在に至るまで、上記の値は大きく変化せず、ほぼ一定の値をとる。

炭酸塩岩と有機物の炭素は地球内部から放出された二酸化炭素に由来する。その $\delta^{13}\text{C}$ の値は -5% であることから、炭酸塩岩と有機物の生産量は $4:1$ であると推定できる。重要な点は、炭酸塩炭素で有機炭素の生成量の比は $4:1$ で、始生代から現在に至るまで、大きく変化していないことである。

生物の進化史を考えると、始生代にはラン藻とバクテリアなどの原核生物が海域に限って生息していた。したがって、それらの生物によって生産された有機物量は小さかったはずで、有機炭素の4倍量という炭酸塩炭素も必然的に小さかったと結論される(秋山, 1986)。

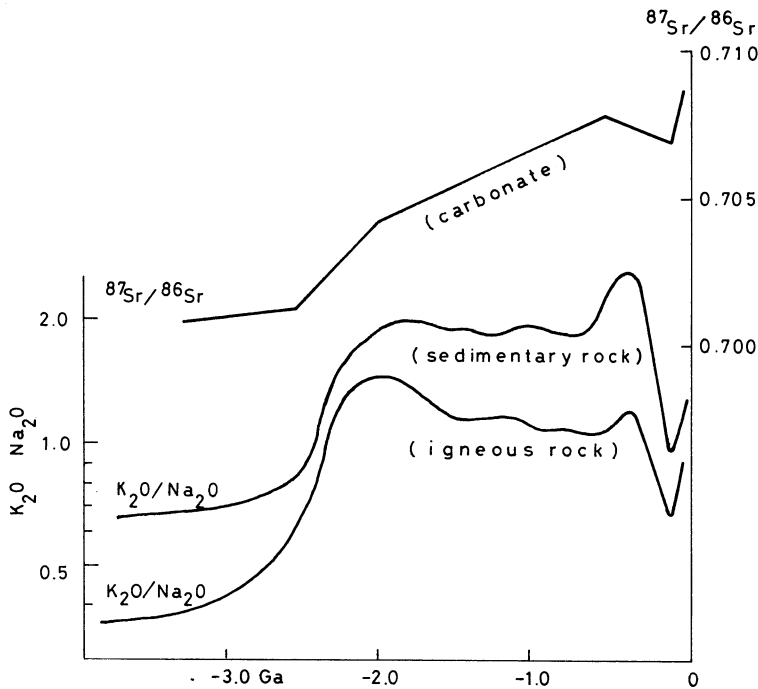
ところが、このような結論に矛盾するような論文が出されていた。それは Reimer ら (1979) の論文である。彼らはアフリカの Fig Tree 層群 (31 億年前) の最下部層にあたる Sheba 累層の有機炭素の研究をもとに、始生代の生物による有機物の生産量について論じている。Sheba 累層の有機炭素含有量は 0.42% で、それを含む地層の堆積速度は現在と変わらないことから、始生代の生物による有機物生産量は現在と大きく変わらな

ったとした。

しかし、Reimer らは堆積に要した時間を算出するのに、新生代の地層できめられた turbidite unit の形成される時間を使っている。つまり、始生代の堆積速度を新生代のそれにおきかえて議論している。

堆積速度の地史の変遷については、すでに Zeuner (1952), 湊 (1953), 井尻 (1956), Chapman (1976), Salop (1977) によって論じられている。私も「地質時代とともに増大する堆積速度」という小論をまとめた (Akiyama, 1985a)。有機炭素の含有率は(イ)生産速度以外に(ロ)堆積速度と(ハ)有機物の保存条件に規定されるはずで、あとの2つの条件を無視するわけにはいかない。始生代は堆積速度が小さかっただけでなく、堆積環境は還元的で、有機物は保存されやすかったことから、始生代の地層中の有機炭素含有量が現在とかわらないという事実はその生産量が小さかったことを意味している。

このように考えてくると、Reimer らの論文は明らかに誤りで、始生代の有機物生産量は小さく、したがって炭酸塩岩の生産量も小さかったことになる。温室効果の問題を考慮すると、カタストロフィック初期脱ガス説は矛盾にみちた仮説になってしまう。



第2図 Sr 同位体比と $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ の地史の変遷 (Veizer and Compston, 1976 と Engel et al., 1974 から) 25 億年前を境として大きな変化が認められる。

Veiger and Compston (1976) は炭酸塩岩に含まれている Sr の同位対比の検討から、始生代末 (25 億年前) に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の著しい増加がおこったことを明らかにした (図 2)。この時期には、火成岩と堆積岩ともに $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ の比も大きくなっている (Engel *et al.*, 1974)(図 2)。この 2 つの事実、この時期に大陸性地殻の増大したことを示している。また、ジュラ紀から白亜紀にかけて、Sr 同位体比の急激な減少がおこっている。この時期にマントルから大量の水がもたらされた、という指摘もなされている (牛来, 1979)。

次に、世界の鉛の大鉱床についてふれてみよう。南アフリカの Day Light (30~32 億年前) からニュージーランドの White Island (~0 年) に至る鉛鉱床の同位体組成を $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ と $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ を軸とするグラフにプロットすると、それらの値のすべてが $\mu = (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}) = 10.75$ の単成長曲線の上ののってくる。この値はマントル起源とされる海洋底玄武岩の同位対比とは一致せず、鉛鉱床の同位体比の均一性は他殻内の均一化の結果による、とされている (小嶋, 齊藤, 1978)。

しかし、成長曲線にのる個々の値を検討すると、アイソクロンとの間に年代差のあることがわかる。10 億年よりも古い年代をもつ鉛の鉱床の場合にはアイソクロンの値よりも若く、10 億年よりも若い場合にはその逆になっている。この差異は年代収差 (age aberration) とよばれているものである。

なぜこのような年代収差があるのかという点については見解の一致はえられていない。しかし、R. D. Russell はきわめて興味深い考えを提示している。つまり、20~35 億年前の地球ではプロト地殻が誕生し、このとき U の大部分がその地殻に移動していったという。そして、Pb については、その後、現在に至るまで連続的な移動が続いた、としている。このような仮定のもとでは、Pb の同位体の年代収差はマントル-地殻の発展として統一的に理解できるという (小嶋, 齊藤, 1978)。

始生代から原生代にかけての時期にプロト地殻が形成されたという主張は Sr の同位体比や $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比のデータと対応するものと考えられる。

以上のべてきた同位体比をもとにした議論から、地殻の形成をともなう変動が始生代から原生代へと移る時期におきた、と考えられる。

始生代の地質系統には炭酸塩がきわめて少なく、原生代に入ると急激な増加が知られている。二酸化炭素の脱ガスがこの時期に大量に生じたことを示唆してい

ると考えられる。水やその他のガスも二酸化炭素とともに放出されたことは論をまたない。

牛来 (1985) は造構運動と火成作用の歴史を調べ、それらの活動の激しかった時期が後期始生代以降 5 回にわたって認められる、としている。その最初の活動がこれまでのべてきた始生代から原生代にかけての事件にあたり、最後の変動がアルプス造山で、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の急激な減少期にあたると考えている (図 2)。

このように見てくると、脱ガスの時期は地球史のなかで何回もおこり、そのつど大気や海水の量を増加させてきたと見ることができる。このような理由から、私は断続脱ガス説 (Intermittent degassing hypothesis) を提唱した (秋山, 1984, Akiyama, 1985b)。

地球の自転周期と海洋

化石サンゴの成長線をもとにして地質時代における 1 年の日数を推定した研究によると、その値は現在の 365.2422 から地質時代をさかのぼるにつれて大きくなり、デボン紀中期で 385~410 日であるとされている (Runcorn, 1967, Walker *et al.*, 1983)。

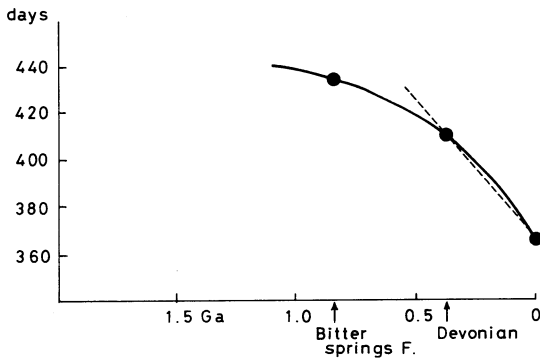
いっぽう、月-地球間の距離はレーザ観測によって精密な測定が可能になっている。その観測結果によると、月は地球から 1 年に 4 cm ずつ遠のいているという。この結果はさきの化石サンゴの研究とよく一致することになる。

このような値を外挿すると、15 億年前には月は地球に近づきすぎ、地球の表面を壊してしまうほど大きな起潮力をもつことになり、地質学上の事実と矛盾することになる。

化石の硬組織の成長線による研究を先カンブリア時代にまで延長させることは、これまで不可能であると考えられていた。しかし、オーストラリアの Bitter Springs 層 (850±50Ma) のストロマトライトがその壁をやぶることになった。(Vanyo and Awramik, 1985)。

ストロマトライトの縞模様を注意深く観察すると、その成長方向は規則的にうねってみえる。この縞模様は太陽高度に垂直に形成されることから、このうねりの構造の周期が 1 年間に相当することになるという。幅数ミクロンのこの縞模様の数をかぞえることで、このストロマトライトが成長した 8.5 億年前の 1 年はおおよそ 435 日であった、と推定されている。なお、このうねりの角度から当時の地球の自転軸の傾きは 26.5 度であったとも述べられている。

現在そして約 4 億年前、8.5 億年前の 1 年の長さを



第3図 地球史における1年の日数の変遷

プロットすると、図3のようになる。この3点は直線上にはなく、それらを結ぶと、古い年代ほど傾きの小さくなる曲線で示される。1年の日数が少なくなること、つまり地球の自転周期を小さくする主な原因は海水の起潮力にあるとされている。40億年前には海水の量が現在量の85%以上になっていたとするカオストロフィック初期脱ガス説では、この事実を説明するのが困難になる。

先カンブリア時代には海水量が少なかったため、月による起潮力は小さく、時代の経過とともに海水量が増加し、起潮力が大きくなり、したがって地球の自転にブレーキがかかってきた、という説明が可能になる。

あ と が き

地球史における脱ガスのシナリオはAr同位体比の研究からカオストロフィック初期脱ガス説としてえがかれている。この仮説では、これまで述べてきたように地質学上の証拠と相いれない点が指摘できる。それは、初期条件の設定に弱点をもち、一次大気が零であったとしたところから生じてくるもの、と考えられる。

この小論では、このような点の議論を掘りおこし、大気と海洋の発展史を水と二酸化炭素に注目しながら述べ、私の断続脱ガス説(秋山, 1984, Akiyama, 1985b)を説明してきた。

それでは、つぎに断続脱ガス説の正否を立証する方法について考えてみたい。

ロシア台地には主として珪岩からなるIyengra垂層群(>35億年)が発達している。厚さ2800mにも及ぶこの地層中には直径1mmにもみえない気泡が多量に含まれている。この気泡の主成分は CO_2 , N_2 , H_2S , HF , HCl などで、そこには希ガスの存在も知られている(Salop, 1977)。しかし、 O_2 は全くふくまれていない。

先カンブリア時代のAr同位体比の分析はガンフリントチャート(19億年前)の例が知られている。その結果は、現在の大気組成と同じで、現在の大気の混入がおこってしまっていた、と結論されている。しかし、Iyengra珪岩の場合にはガスの組成が現在の大気のそれと完全に異なっていると同時に、予想されている原始大気に類似しているところから、始生代の大気の化石である可能性が高い。この大気の化石のAr同位体比の検討が断続脱ガス説の正否を決める鍵となろう。カオストロフィック初期脱ガス説によれば、この時期に脱ガスはほぼ完了したはずであるから $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の値は現在の大気の295.5に近い値をとるはずである。また、私の断続脱ガス説に従えば、その値は一桁小さな値になるはずである。

その分析結果が待たれるところである。

謝 辞

この小論を執筆する機会を与えて下さった島根大学理学部地質学教室の教官諸氏に御礼申し上げる。また、製図の労をとって下さった熊野純男氏に謝意を表したい。

文 献

- 秋山雅彦, 1984: 地球大気と海洋の起源—地史からの検討。地球科学, **38**, 221—225.
- Akiyama, M., 1985a: Increasing rate of sedimentation with the geologic history. *Earth Science*, **39**, 85—88.
- Akiyama, M., 1985b: A geological consideration of the primordial ocean and atmosphere of the earth. *Modern Geology*, **9**, 301—307.
- 秋山雅彦, 1986: 地球史における有機物生産量の変遷。田口一雄教授退官記念論文集, 209—213.
- Barley, M. E., Dunlop, J. S. R., Glover, J. E. and Groves, D. I., 1979: Sedimentary evidence for an Archean shallow-water volcanic-sedimentary facies, eastern Pilbara Block, Western Australia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **43**, 74—84.
- Brown, H., 1952: Rare gases and the formation of the earth's atmosphere. In G. P. Kupier, ed., *The Atmosphere of the Earth and Planets*, Chicago Univ. Press, 258—266.
- Chapman, R. E., 1976: *Petroleum Geology*. Elsevier, Amsterdam.

- Engel, A. E., Itoson, S. P., Engel, C. G., Stickney, D. M. and Cray E. J. Jr., 1974 : Crustal evolution and global tectonics : A petrogenic view. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **85**, 843-858.
- 牛来正夫, 1979 : 海水量の地史的変遷についての一提言・地質雑, **85**, 541-542.
- 牛来正夫, 1985 : 玄武岩質火成活動の大周期性についての再検討. *Magma*, **75**, 9-11.
- Harland, W. B., Cox, A. V., Llewellyn, P. G., Pickton, C. A. G., Smith, A. G. and Walters, R., 1982 : A Geologic Time Scale. Cambridge Univ. Press.
- 井尻正二, 1956 : 古生物学. 理論社, 東京.
- Mason, B. and Moore, C. B., 1982 : Principles of Geochemistry. 4th ed., John Wiley & Sons.
- 湊 正雄, 1965 : 地層学. 岩波書店.
- 中沢 清, 1978 : 原始太陽系星雲と地球原始大気の散逸. 科学, **48**, 430-434.
- 小嶋 稔, 1978 : 惑星大気の起源-地球の場合. 科学, **48**, 435-440.
- 小嶋 稔, 齊藤常正 (編), 1978 : 地球科学 6, 地球年代学. 岩波書店, 東京.
- Reimer, T. O., Barghoorn, E. S. and Margulis, L., 1978 : Primary productivity in an early Archean microbial ecosystem. *Precambrian Res.*, **9**, 93-104.
- Runcorn, S. K., 1967 : Corals and the history of the earth's rotation. *Sea Frontiers*, **13**, 4-12.
- Salop, L. J., 1977 : Precambrian of the Northern Hemisphere. *Elsevier*, Amsterdam.
- Schidlowski, M., 1978 : Evolution of the earth's atmosphere : Current state and exploratory concepts. In H. Noda, ed, *Origin of Life, Japan Sci. Soc. Press*, 3-20.
- Schidlowski, M., 1982 : Content and isotopic composition of reduced carbon in sediments. In H. D. Holland and M. Schidlowski, eds., *Mineral Deposits and Evolution of Biosphere*, Springer-Verlag, 103-122.
- Vanyo, J. P. and Awramik, S. M., 1985 : Stromatolites and Earth-Sun-Moon dynamics. *Precambrian Res.*, **29**, 121-142.
- Veizer, J. and Compston, W., 1976 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Precambrian carbonates as an index of crustal evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, 905-914.
- Walker, J. C. G., Klein, C., Schidlowski, M., Schopf, J. W., Stevenson, D. J. and Walter, M. R., 1983 : Environmental evolution of the Archean-Early Proterozoic Earth. In Schopf, J. W. (ed.) *Earth's Earliest Biosphere, Its Origin and Evolution*, Princeton Univ. Press, New Jersey, 260-290.
- Zeuner, F. E., 1952 : Dating the Past. Methuen & Co. Ltd., London.