

地球の大気組成の変遷——創成期から石炭紀まで（講義資料）

八木下 晃 司*

(2007年2月6日受理)

Koji YAGISHITA

Evolution of the Earth's atmosphere : from the beginning to the Carboniferous

はじめに

今から約46億年前（すなわち4600Ma, 1Ma = 百万年前、以後、過去の年代はMaで表記する）、直径10程度の多数の微惑星の衝突・集合により地球は誕生した。

このとき、微惑星群には未分化の隕石として知られるC1コンドライトが含まれており、これが地球の「水の惑星」としての誕生へとつながっていったことはよく知られている。地球～太陽間の距離 1.5×10^8 （1天文単位、1A・U）は、C1コンドライトより放出された水分からなる上空の厚い雲層を長期間保持するのに役立ち、地表におけるマグマオーシャン（magma ocean）の冷却後の大量の降雨、そして地球誕生後間もない大洋の形成にあずかった（Matsui & Abe 1986）。創成期における 1.9×10^{21} g というシュミレーションによる地表の全水量は、現在、地表にある実際の総水量 1.5×10^{21} g と大差はない。誕生後間もない時期に、地球は既に大海を有していたという松井らの仮説は、Waltherらの地球内部からの長期にわたる水の沁み出し説（Mason, 1958）などを大きく書き換え、今日の地球史観の根幹を成すことになった。

地表の膨大な量の海水こそが、やはり創成期に圧倒的な量をほこっていた大気中の二酸化炭素 CO_2 （当時98%以上）の極端な減少（現在は

0.036%、すなわち360ppm）を導いて行ったのであるが、この小論では CO_2 の減少のプロセスを4段階に分けて検討してみる。なおこの CO_2 減少プロセスを記述する際に、近年支持を拡大している全地球氷河（凍結）説（theory of snowball Earth）にも若干ふれてみる。筆者（八木下）がかつて1990年代前半に「地球史学」を開講していた当時からみると、暁新世末の地球の急激な温暖化を示すLPTM問題（例、Bains et al., 1999; 八木下, 2003）、あるいは全地球氷河説をはじめとして新たな事実についての論議も活発である。地球史について新たな地質学的（堆積学的）事実が見つかり、それに伴う新仮説が提唱されれば、その都度、簡単な覚書を筆者は作成することになっている。

金星・火星

半径約6100と、大きさが地球によく似ている金星にもその創成期には微惑星の衝突熱によるマグマオーシャンは形成された。しかし金星～太陽間の平均距離は地球～太陽間より28%短いため（0.72AU）金星上空には雲の層は形成されなかったとされる。よく知られている光量（放射線量）と距離との関係式からもこのことは推察される。

$$Ld^2 = k \text{ (constant)}$$

ここでL：光量、d：距離

つまり金星が太陽から受ける紫外線の量は地球の

*岩手大学教育学部

それに比して2倍以上に達するため、結局、上空の水は酸素と水素ガスに分解され宇宙に逃げたとされる。

一方、太陽間との距離を十分に保っている火星(1.52 A・U)のでは、マグマオーシャンの冷却後、その全表面は厚い氷河とその堆積物で被われていたらしい。しかし、これも4000Ma前後の2回にわたる微惑星群の衝突とその熱により雪氷は一気にとけだし、想像を絶する洪水を起こしたとされる(Robinson & Tanaka, 1990)。最近では、火星に着地したランドローバーの探査機Opportunityが、地球の河床や浅海底で観察されるさまざまな堆積構造とまったく同一の露頭写真を送信してきている(Grotzinger et al., 2006)しかしその後火星は、地球に比してはるかに小さい引力しか持たないが故に(火星の半径は約3400)、この惑星も水を失った。Priem(1990)は火星と金星になぜ水が存在しないかという経緯について、かつて次のように述べている。

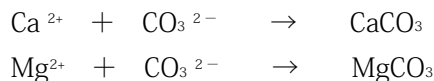
Venus lost all water because of runaway greenhouse conditions, while Mars probably lost most of his volatiles because of the early episode of large-scale impacting---which ravaged all planets, but was more effective on the martian atmosphere because of planet's smaller gravity.

二酸化炭素減少のプロセス

(1) 二酸化炭素の海洋における無機的沈殿

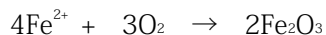
地球の創成期における大気組成は、現在の金星や火星の大気組成と大差はないと考えられている(Table 1-1)。すなわち圧倒的な量を示す二酸化炭素(CO₂)とわずかな酸素(O₂)が特徴的である。この圧倒的に多かった二酸化炭素を急激に減じさせた酸性雨の果たした役割は大きい。マグマオーシャンの冷却後、地表に露出していた玄武岩質溶岩の主たる造岩鉱物中には、カルシウム、鉄あるいはマグネシウムなどの元素が多く含まれる。これら造岩鉱物(例えば、灰長石(CaAl₂Si₂O₈))

カンラン石((Mg,Fe)₂SiO₄)が酸性雨により溶解して、カルシウムイオンやマグネシウムイオンが海に注ぎ、炭酸イオンと結合して沈殿したというのが最初のプロセスであった。つまり海底では、無機的に沈殿した石灰岩(CaCO₃)や苦灰岩(MgCO₃)が大量に堆積していった。



(2) ラン藻の出現と縞状鉄鉱床の形成

地球史では3500Maという地質時代に、はやくも光合成を行えるラン藻が登場する。しかし世界各地で見つかるラン藻がつくる化石、ストロマトライト(stromatolite)の地質年代は2500Maから1800Maに集中している。光合成の可能なラン藻の出現は、海水に溶け込んでいた二酸化炭素(炭酸イオン)を減少させ、ひいては大気中の二酸化炭素を減らした。また光合成の結果として海水中に放出される酸素O₂も重要であった。しかしながらこの時代に生産された酸素の多くは、当時まだ海水中に大量に溶けていた鉄イオンと結びつき鉄の堆積層を形成した。すなわち縞状鉄鉱層(床)の形成である。例えば2価の鉄イオンと酸素分子の結合は



となるが、ラン藻の光合成作用は季節によって活性度が異なる。したがって鉄の堆積層は、光合成の不活発な「冬」の季節に堆積する泥層と交互に重なり合い縞状鉄鉱層(床)を形成する。オーストラリアのハマスレー、ブラジルのウジミナスなど、規模の大きい鉄鉱床はこの地質時代に形成されたものが多い。

(3) サンゴ

古生代も後半になると、海洋では造礁性サンゴが繁殖するようになった。ことに超大陸パンゲア(Pangea)の内海であるテーチス海(Tethys)ではサンゴ礁がよく発達した。大船渡市周辺の日頃市層や日本各地の石灰岩層(その多くはセメント材料として採掘されている)は、テーチス海で形

成されたものである。サンゴの骨格を成す石灰岩の形成により、海水中の二酸化炭素は相当量、固定されたはずであるが、石灰岩に限定した二酸化炭素の固定量の試算はまだ行われていないようだ。

(4) 石炭紀におけるシダ植物の繁茂

デボン紀の初頭(400Ma)、海辺の藻菌類がまず陸上に進出し、ついで維管束を有するシダ植物がさらに内陸へと進出していった。ヨーロッパにおける石炭紀(Carboniferous)は、北米大陸では eustatic な造陸運動によって下部のミシシッピ一層(Mississippian)と上位のペンシルバニア層(Pennsylvanian)に分けられるが、いずれにしても石炭紀にはヨーロッパではルール地方などの大炭層が、また北米ではイリノイ州やペンシルバニア州などで炭層が形成された。いうまでもなくこれらの炭層は、シダ植物による森林がもとになっている。またこの大森林の発達に伴う光合成による二酸化炭素の固定は相当量になったであろう。

石炭と同様に石油も化石燃料として大量の二酸化炭素を固定した。しかし今日生産されている石油の多くは中生代起源であるのでここでは省略したい。しかし全ての化石燃料、また炭酸塩岩に固定された二酸化炭素を大気中に戻すと、地球の大気圧は70barになり、そして現在78.1%の窒素(N₂)は約2%にまで圧縮されるというPriem(1990)の見解は注目に値する(Table 1-1, 1-2)。

(Table 1-1) Hypothetical atmospheres of the terrestrial planets (original stage)

	Venus	Earth	Mars
CO ₂	96.5	98	98%
N ₂	3.4	1.9	1.7%
O ₂	trace	trace	trace
Ar	0.004	0.019	0.085%
H ₂ O	~ 1000	3000	~ 100meter
Total pressure	~ 90	~ 70	~ 2bar

(Table 1-2) Atmospheres of the terrestrial planets (present)

	Venus	Earth	Mars
CO ₂	96.5	0.035	95.3%
N ₂	3.5	78.1	2.7%
O ₂	trace	20.9	0.13%
Ar	0.007	0.93	1.6%
Total pressure	88	1	0.0064bar

After Priem (1990)

全地球氷河(凍結)説

三葉虫など肉眼で認識できるような動物群が爆発的に出現した古生代カンブリア紀の前の740Maから580Maまでの地質時代、すなわち原生代末期に全地球表面が4回にわたって厚い氷河に覆われていたとする仮説が登場した(Hoffman *et al.*, 1998a;1998b)。この仮説は、単に地球史における一つの地質時代が異常な寒冷気候のもとにあったという議論のみならず、大気中の二酸化炭素減少のプロセス、また古生代初頭に、なぜ突然のごとく大型動物群が出現したのか、という古生物学上の問題についても新たな光を投げかけている。この仮説が提唱されて以来、その支持者は日本の研究者も含めて急速に拡大しており(川上, 2003)、仮説についての疑問点は次々と論破されている。それは白亜紀末(65Ma)に巨大隕石が衝突し、地表環境が一変したとするAlvarezらの仮説(Alvarez *et al.*, 1980)が、隕石衝突によるクレーターの確認によって到着するまでに(Hildebrand *et al.*, 1991)、10年以上の年月を要した(八木下・平, 1990; 八木下, 1993)のとは比べてみても仮説支持の拡大は急速である。

Hoffman や Schrag らが全地球氷河(凍結)説(snowball Earth)を提唱したきっかけは、アフリカ、ナムビア共和国でのわずか2~3mの厚さの氷河堆積層(Ghuab層)と、その直上にある約280mの厚さの石灰岩・苦灰岩層(これらをまとめて炭酸塩岩層と言ってもよい)の露頭観察であった(Hoffman & Schrag, 2000; 2002)。ここでいう氷河堆積層とは、氷河末端部に発達するいわゆ

るモレーンなどの堆積層ではなく、巨大な氷山が海洋上で岩塊を落とすドロップストーン(dropstones)を含むダイアミクタイト (diamictite) とよばれるものである。彼らが認めたナムビアの地層の層序で注目すべきは、ダイアミクタイトの直上に非常に厚い炭酸塩岩層の Maieberg 層が重なっている事実である。ダイアミクタイトの Ghuab 層を含む Tsumeb Subgroup の最上部の年代は 540 ~ 560Ma とされており、石灰岩層はその上に整合的に重なっていることから、古生代以前に堆積したものであり、上述のサンゴ礁起源などではなく明らかに二酸化炭素の無機的沈殿により形成されたものである。

また注目すべきは、わずか 2 ~ 3 m の厚さのダイアミクタイトの直上にその 100 倍近い厚さの石灰岩層 (炭酸塩岩層) が堆積し、これが何回かのサイクルを示すように重なっていることである。これを Hoffman らは極寒の気候から温暖な気候への急変、そして再び極寒の到来、というような気候変動のサイクルとして考えている。原生代末の太陽光は現在より約 6 % 弱かったとされ、また当時の大気中の二酸化炭素濃度は 1320ppm (Donnadieu *et al.*, 2004) と試算されている。このような地表環境のもとで、まず何らかのきっかけにより (1) 雪氷が解けず大陸上に積もる。(2) 雪氷は太陽光を反射し (これをアルビード効果という) 大陸地塊は冷え、ますます雪氷が積もり氷河が形成される。(3) しかし一方では、このような気候変化とは無関係に各大陸の火山活動は継続され、大気中に二酸化炭素が放出される。(4) この間、空からは雨ではなく雪が降り続けるので、酸性雨によって大気中の二酸化炭素は減じることはなく、さらに増加する。(5) 異常な二酸化炭素の増加、つまり温室効果により、地表は一気に温暖化に向かう。(6) 氷河は消失し、露出した岩塊は酸性雨による風化作用を受け、カルシウムイオン、マグネシウムイオンが海洋に注ぎ込み、大量の炭酸塩岩の無機的沈殿を生じる。(7) こうして大気中の二酸化炭素は急激に減少し、地表は再び寒冷化する (Fig. 1)。

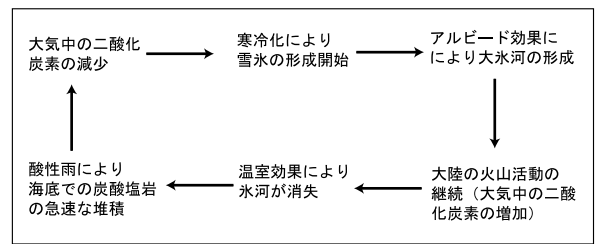


Fig. 1 原生代末の氷期～間氷期のサイクル仮説。氷期における陸上の火山活動が大気中の二酸化炭素増加のもとになっている (Hoffman & Schrag, 2000 による)。

ではなぜ原生代末になって、このような厳しい気候変動のサイクルが発生したのであろうか？

Donnadieu らは、その答えを 800Ma に存在していた超大陸ロヂーニア (Rodinia) が分裂・解離したことにあつたとみている (Donnadieu *et al.*, 2004)。分裂した各大陸の岩塊の風化・侵蝕、そして溶解した元素を含む多数の河川の大洋への注ぎ込みにより、大気中の二酸化炭素は 1320ppm にまで減じたと彼らは試算している。

ところで Hoffman らが大氷河が赤道付近でも発達したと考えた理由は、原生代末の大陸分布が地球の低緯度地帯に集中していたからである。これに疑問をもった Sohl らは、原生代末の各大陸の古地磁気を検証し、残留磁気の伏角などを調べたが、やはりそれらは低緯度にあつたとする結論を得た (Sohl *et al.*, 1999)。なおこの地質時代に地球の自転軸が横転し、低緯度地帯が寒冷地帯になったとする Williams (1993) の仮説は否定されている。

堆積速度に関しては、層厚わずか 2 ~ 3 m のダイアミクタイト層 (Ghuab 層) が形成されるのに約 1000 万年 (Hoffman *et al.*, 1998b)、その上の厚い炭酸塩岩層 (Maieberg 層、280m) には約 540 万年という試算がされている (Hoffman *et al.*, 1998a)。炭酸塩岩層の堆積速度はダイアミクタイトに比してかなり大きい (52 m / 百万年) ことがわかる。一方、中央アフリカのコンゴ地塊の Marinoan ダイアミクタイト層 (層厚 > 30 m) では、この層が形成されるのに 300 ~ 1200 万年という試算がされている (Bodidelitsch *et al.*, 2005)。Bodidelitsch らは、ダイアミクタイト直上のイリジウム (Ir) の濃度から堆積速度を算出した。

長い極寒の気候から、極短時間で地球全体が温暖化するという激変する気候サイクルのもとでは、海洋生物群が繁殖し、進化するということはないであろう。事実、ダイアミクタイトのGhaub層を挟んだ炭酸塩岩層、すなわち下位のOmbaatjie層と上位のMaieberg層の炭素同位体比 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ の値は異常な負の逸脱値CIE (carbon isotope excursion)を示している (Fig. 2)。これは当時の海洋には生物群がきわめてわずかしかなかったことを示唆しているのである (なお炭素同位体比の算定式とその値の解釈については「付記」を参照されたい)。つまり原生代末期の海洋では、生物群にとっては耐え難い「ストレス」が蓄積されていたと考えられる。そしてこのストレスに耐え得た生物のみが、氷河が完全に去った次の古生代カンブリア紀に爆発的に繁栄・進化したと考えられる。言い換えると古生代直前の厳しい気候変動は、次のカンブリア紀の生物進化の準備期間とも考えられる。

付記

$\delta^{13}\text{C}$ は炭素同位体 ^{13}C と ^{12}C の比を標準物質と比較し、パーミルで表した値。生物群は軽い ^{12}C を選択的に体内に取り組むことが知られているので、この値を利用して海洋における生物群の繁殖状況などを推定することができる

$$\delta^{13}\text{C} = \left\{ \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\text{sample}} \right) / \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\text{standard}} \right) - 1 \right\} \times 1000$$

なお ^{12}C , ^{13}C の存在度は、それぞれ98.9%,および1.1%である。

文献

- Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F. & Michel, H.V., 1980; Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, **208**, 1095-1108.
- Bains, S., Corfield, R.M. & Norris, R.D., 1999; Mechanisms of climate warming at the end of the Paleocene. *Science*, **285**, 724-726.
- Bodiselsch, B., Koeberl, C., Master, S. & Reimold, W.U., 2005; Estimating duration and intensity of Neoproterozoic snowball glaciations from Ir anomalies. *Science*, **308**,

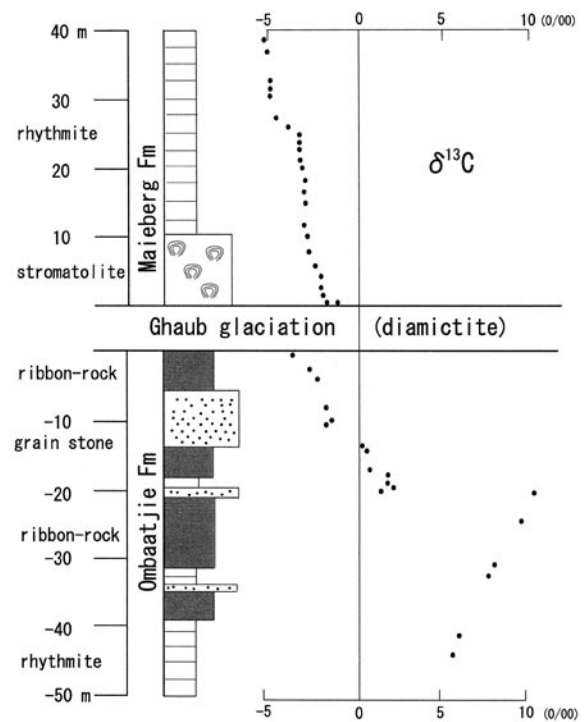


Fig. 2 氷期の堆積層 Ghaub 層を挟む炭酸塩岩層の $\delta^{13}\text{C}$ の負の逸脱値 (Hoffman et al., 1998b を改変)。

239-242.

- Donnadieu, Y., Godderis, Y., Ramstein, C., Nedelec, A. & Meert, J., 2004; A 'snowball Earth' climate triggered by continental break-up through changes in runoff. *Nature*, **428**, 303-305.
- Grotzinger, J. et al., 2006; Sedimentary textures formed by aqueous processes, Erebus crater, Meridiani Planum, Mars. *Geology*, **34**, 1085-1088.
- Hildebrand, A.R., Penfield, G.T., Kring, D.A., Pilkington, M., Camargo, Z.A., Jacobson, S.B. & Boynton, W.V., 1991; Chicxulub crater: a possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Geology*, **19**, 867-871.
- Hoffman, P.F. & Schrag, D.P., 2000; Snowball Earth. *Scientific American*, **282**, 62-75.
- Hoffman, P.F. & Schrag, D.P., 2002; The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, **14**, 129-155.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J. & Halverson, G.P., 1998a; Comings and goings of global glaciations on a

- Neoproterozoic tropical platform in Namibia. *GSA Today*, **8**, no.5, 1-8.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. & Schrag, D.P., 1998b; A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, **281**, 1342-1346.
- 川上 紳一郎 2003; 全地球凍結 集英社、東京、203pp.
- Mason, B., 1958; *Principles of geochemistry*. John Wiley & Sons, New York, 310pp.
- Matsui, T. & Abe, Y., 1986; Evolution of an impact-induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth. *Nature*, **319**, 303-305.
- Priem, H.N.A., 1990; Strange relatives – Earth and her sibling neighbours. *Geologie en Mijnbouw*, **69**, 391-406.
- Robinson, M.S. & Tanaka, K., 1990; Magnitude of a catastrophic flood event at Kasei Valles, Mars. *Geology*, **18**, 902-905.
- Sohl, L.E., Christie-Blick, N. & Kent, D.V., 1999; Paleomagnetic polarity reversals in Marinoan (ca.600Ma) glacial deposits of Australia: Implications for the duration of low-latitude glaciation in Neoproterozoic time. *GSA Bull.*, **111**, 1120-1139.
- Williams, G.E., 1993; History of Earth's obliquity. *Earth-Science Reviews*, **34**, 1-45.
- 八木下 晃司 1993; いわゆる“K-T境界問題”についての最近の研究動向 地学雑誌、**102**, 205-216
- 八木下 晃司 2003; 古第三紀における気候変動—近年の研究動向— 静岡大学地球科学研究報告、**30**, 47-58.
- 八木下 晃司・平 朝彦 1990; 白亜紀～第三紀（K-T）境界の異常堆積—問題の現状と展望— 地質学雑誌、**96**, 51-64.