

第 13 ～ 14 話 地球史 46 億年間の環境変化

はじめに

人間活動から発生した二酸化炭素の温室効果により、21 世紀の地球は温暖化するという議論がある。一方、太陽活動の停滞により、これから小氷期が訪れるのではないかという意見もある。私は、地質学を専攻して地面を這い回ってばかりいるため、現在の気組成や地球上の気温の分布について、あまり詳しい知識をもっていない。一方、地質学は、現在の地球上に残された様々な痕跡から、地球史 46 億年間の地球環境の変化を明らかにしてきた。本日は、地質学が明らかにしてきた地球環境変化のモデルを、その問題点も含めてわかりやすく説明できればと思っている。

最初の講義で触れたが、地質学は大きく見て一般地質学と地史学に分けられる。**一般地質学** (physical geology) は、(1) 地球を構成する物質と、(2) 地球の活動過程の理解に関係した分野である。一方、**地史学** (historical geology) は、地球における過去の出来事の編年および年代決定を目的とした分野である。地史学によって、いつ海洋ができたのか、いつ最初の恐竜が登場したのか、といった疑問が解決される。

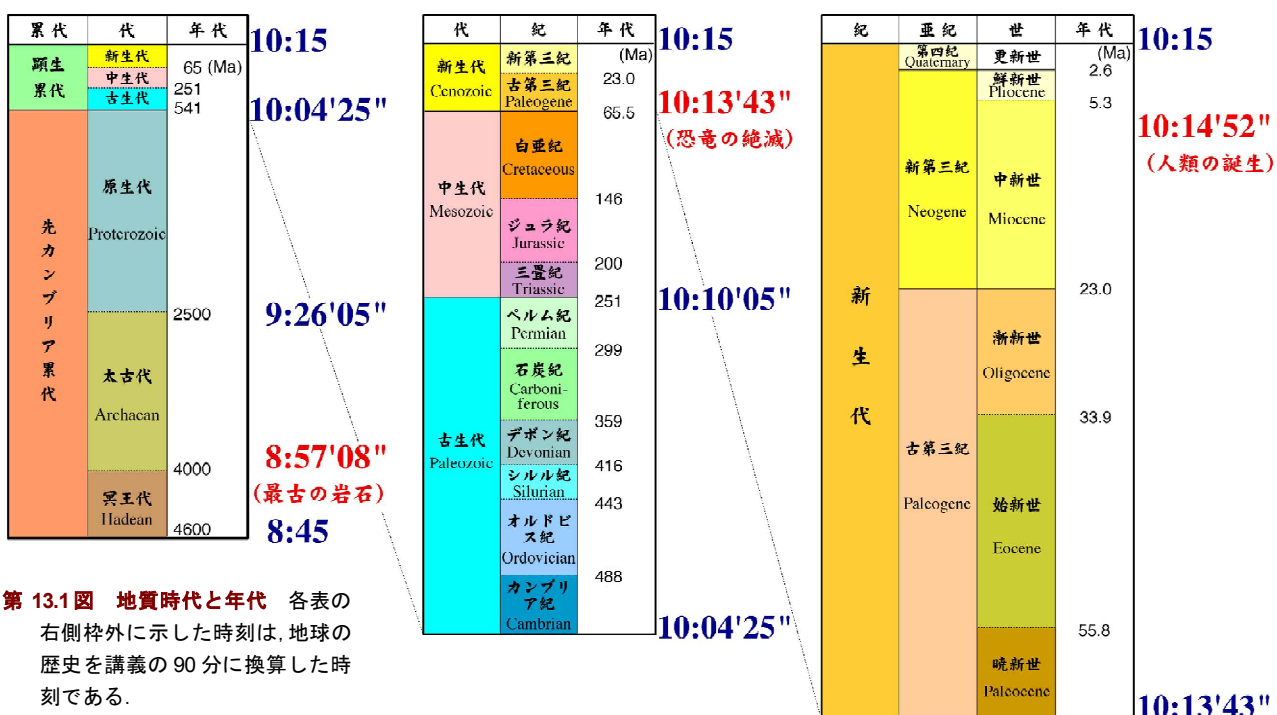
地球環境の変化に関して、一般地質学と地史学に対応するような 2 つの考え方がある。それが、**斉一説** (uniformitarianism) とは、我々の身の回りで今日進行しているようなゆっくりとした変化が絶え間なく続くことにより、大きな環境変化につながるという考え方である。一方、**天変地異説** (catastrophism) は、地球の日常的な活動過程では説明できない現象が、何万年、

何億年に 1 回地球を襲い、大きな環境変化を起こすという考え方である。18 世紀頃までは、天変地異説が大勢を占めていたという。旧約聖書における大洪水の記述や、絶対君主制からの革命という社会背景が、科学者の考え方にも影響を与えた可能性がある。18 世紀末頃から、天変地異説は、地質学的な根拠に照らして再検討され始めた。数多くの証拠を集め、天変地異説に対抗する仮説を提唱した英国人に、現代地質学の父と呼ばれる **ジェームス・ハットン** (James Hutton: 1726–1797) がいる。彼の考えが斉一説へと発展し、初め英国で、その後米国で主流な考え方となった。英米という、世界の「一等国」で斉一説が主流になったため、世界中で天変地異説的な考え方は学界の表舞台から消え去った。「現在は過去を解く鍵である。」という言葉に表されている通り、斉一説の流行は、一般地質学の位置づけを高め、地史学の位置づけを相対的に低くした。天変地異説は、20 世紀後半になって、一定の再評価を受けるようになり今日に至る。それは、恐竜絶滅に関する「隕石衝突説」の評価と重なる。

やはり、科学者は、現在の地球を知ったことで事足りるとせず、過去に未知の世界があった可能性を常に意識する謙虚さをもつ必要がある。本日は、そういった謙虚な態度で (?), 地球史 46 億年間の環境変化を振り返ってみる。

地球の誕生～冥王代

46 億年といわれる地球の歴史 (第 13.1 図) だが、その詳細は、まだまだ不明な点だらけである。特に、地球上に現存する最古の岩石 (カナダのアキャスタ片麻岩) は、39.8



第 13.1 図 地質時代と年代 各表の右側枠外に示した時刻は、地球の歴史を講義の 90 分に換算した時刻である。

億年前のものであるため、それ以前の地球の姿を実際の岩石に基づき議論することはできない。地球誕生から現存する最古の岩石の誕生までの時代（今から約 40～46 億年前）を**冥王代**（*Hadean*）と呼ぶ。冥王代の地球については、隕石や月の岩石からのデータと（熱）力学的なモデル計算から、様々な推論がなされているに過ぎない。

地球の誕生は約 46 億年前、太陽系の誕生とほぼ同時期のできごとと考えられている。そう推定する理由および推定の仮定は、以下の通りである。（1）太陽系の形成とは、ガスから凝縮した微粒子が衝突合体して、コンドライト（コンドリュールという小球を含む隕石）、微天体、さらには惑星を形成する過程であったと見られている。（2）C₁ コンドライトという、最も始源的コンドライトの形成年代は、46 億年に集中する傾向がある。（3）地球の兄弟ともいえる月の最古の岩石も、約 46 億年前のものである。

地球全体の化学組成は、炭素質コンドライトという隕石（第 13.2 図）の化学組成に似ている。炭素質コンドライトには、炭素（C）と、OH 基をもつ含水鉱物が含まれる。すなわち、水（H₂O）や有機物（C、H、O 主体の化合物）の源を含む隕石といえる。例えば炭素質コンドライトを熱すると、重量比にして 0.6%（1 kg の隕石から 6 g）の水蒸気が出てくる。海は広いな大きいなという歌があるが、地球全体の質量に比べて海水の質量は 0.03% 程である。すなわち、隕石に含まれる水だけでも、地球の海は十分作れる計算になる。

地球は、この様な隕石、あるいは隕石が集合してできた微天体が、衝突合体することにより形成されたと考えられている。地球形成過程には、次の様なイベントが推定されている。

- (1) 原始大気の形成（地球が 0.2 半径まで成長した頃）：地球の質量が、大気を保持し得る程になる。
- (2) 核とマグマオーシャンの形成（0.5 半径）：金属鉄が地球中心部へ沈降し、核を形成した。その時に鉄が放出した重力エネルギーや、引き続く微天体衝突によるエネルギーで、地球表層 1,000 km あまりが融解して、マグマ・オーシャン（マグマの大洋）を形成した。



大きさ	50×40×30mm
落下・発見年代	Fall: 1969.28
落下・発見場所	Allende, Chihuahua Mexico

第 13.2 図 炭素質コンドライトの例(アエンデ隕石)

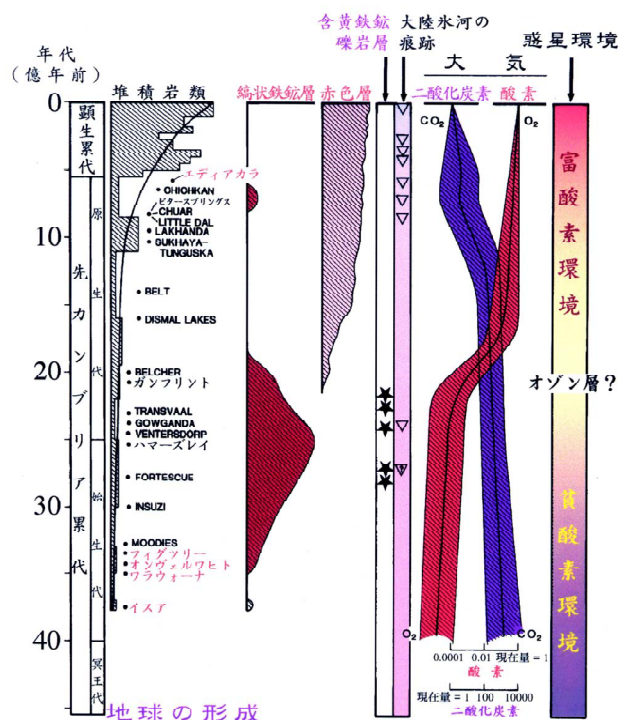
- (3) 月の形成（0.5?～1 半径）：質量が地球の 1/10 程（現在の火星程度）もある原始惑星が地球に衝突し、その一部（質量が地球の 1/100）が地球を回る軌道に乗り、月になった。
- (4) 原始海洋の形成（～1 半径）：高温のマグマ・オーシャンから放出された水分が、雨となって降り注ぎ、原始海洋として地表を覆った。1,000°C もあった高温のマグマ・オーシャンは、原始海洋により 200°C 以下にまで冷却した。

太古代の地球（約 40 億～25 億年前）

大陸地域の先カンブリア時代の地層は、多くの場合、基盤岩類と被覆層に 2 分される。基盤岩類は、強い変形と変成作用（地下深部の高温にさらされて、岩石の構成鉱物組合せが変化する作用）を受けた大陸地殻の岩石で、その上を浅海成の水平な被覆層が覆う。**太古代**（*Archean*）は、当初、この内の基盤岩類が形成された時代として定義された。しかし、その定義では、時代境界（太古代の終わり）の年代が場所ごとにやや異なってしまうため、今日では約 25 億年前をもって太古代の終わりとする。上記の地質から見て、太古代というのは、バラバラだった大陸地殻が衝突・合体し（変形・変成作用を伴う）、小型の大陸を作り始めた時代といえる。太古代の地球の様子は、以下の様だったと考えられている。

陸と水の存在

太古代の初めにも、陸と液体の水が地表に存在したらしい。例えば、グリーンランドのイスア地域には約 38 億年

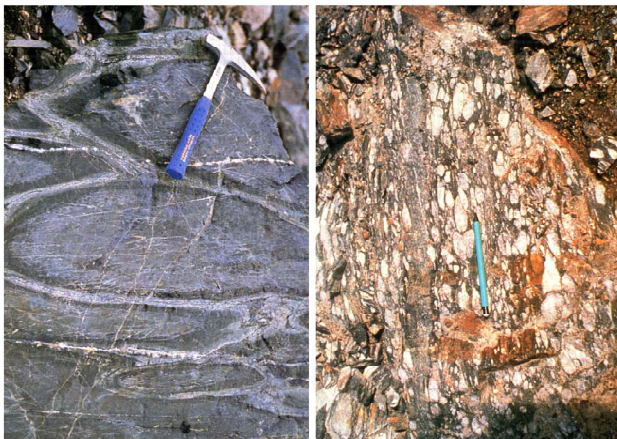


第 13.3 図 地質時代における地球環境の変化 Schopf (1991) の図を改変。

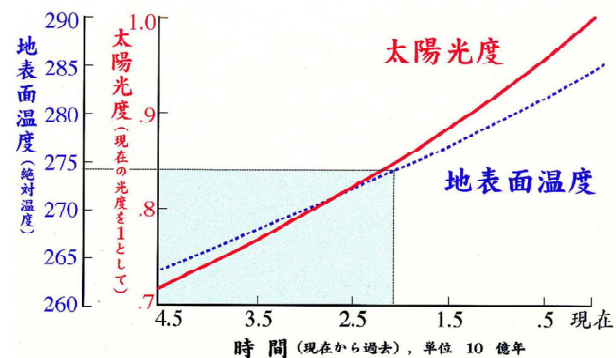
前の地層が分布するが、そこには円礫岩（流水中でぶつかり合って円磨された礫が、水中に堆積した地層）や枕状溶岩（水中に流出した溶岩）が見られる（第13.4図）。これらの証拠は、地球表面に礫を供給する陸と液体の水が存在していたことを示す。液体の水が存在することにより、大気圧が余程低くない限り、地表の温度は 0°C 以上であったと推定できる。

二酸化炭素に富む大気

太古代の少なくとも初期には、大気組成は現在と大きく異なり、酸素に乏しくメタンや二酸化炭素に富んでいたと考えられる（第13.3図）。現在、地表の炭素の90%は、炭酸塩岩（石灰岩など）の形で固定されているが、その多くは海水への溶解した二酸化炭素（炭酸イオン）から無機的に形成されたり、太古代後期～顕生累代に生物のはたらきで形成されたりしたものである。太古代には、それら多量の炭素は、メタンや二酸化炭素という温室効果気体として大気を構成していたと見られている。二酸化炭素に富む大気は、還元的な環境をつくる。実際、太古代前期には、酸化的な環境を示唆する金属酸化物などはあまり見られない。むしろ、堆積物中には、還元的な環境を示唆する硫化鉄（黄鉄鉱）などが多量に含まれることがある。二酸化炭素やメタンは、現在、“温室効果気体”として注目されて



第13.4図 グリーンランド、イスアの岩石 液体の水の存在を示唆する、枕状溶岩（左）と円礫岩。

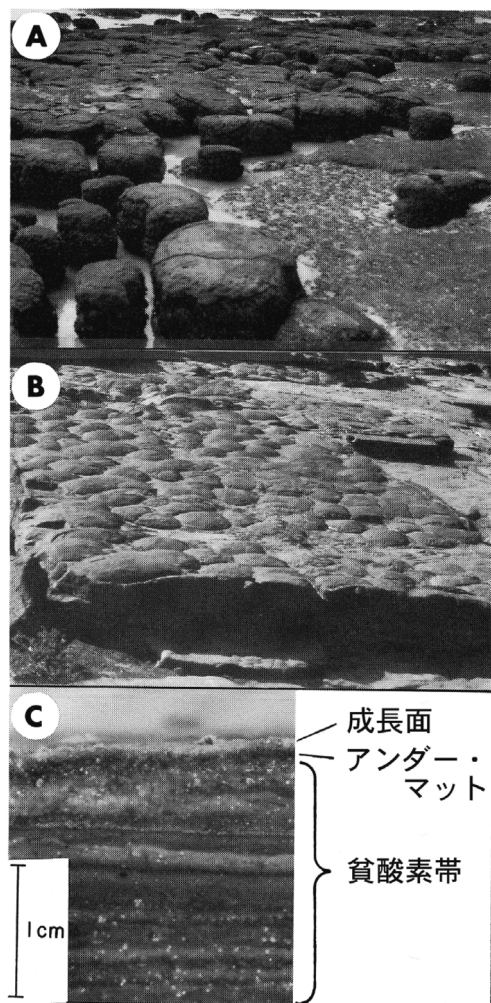


第13.5図 暗い太陽のパラドクス 地球の大気組成がずっと現在と同じであれば、20億年前以前の地表の気温は氷点下になるという計算結果。

いる。太古代の地表も、温室効果気体に暖められていたことを示唆する計算結果がある。それは、暗い太陽のパラドクスと呼ばれている。太陽は水素を燃やしてより重いヘリウムを燃えカスとしてためているため、太陽中心部は徐々に重くなり、そのため太陽は徐々に明るくなっているという。計算では、20億年前の太陽の明るさは現在の85%で、現在の大气組成では地表の温度が氷点下になるという（第13.5図）。ところが、上述の様に液体の水が存在した証拠が見られ、氷河の痕跡などは存在しない。最古の氷河の痕跡は、原生代前期のものである。

生命の誕生

38億年前のイスアの堆積岩層中には、生物起源と考えられる有機炭質物が既に含まれている。世界最古とされる化石は、南アフリカ・バーバートン山地のオンヴェルワヒト層群、および西オーストラリア・ピルバラ地域のワラウォーナ層群（いずれも約35億年前）のチャート層から産する。化石は、球状または紐状のラン藻類（cyanobacteria）のものである。他の先カンブリア時代の多くの化石も、ラン藻類の化石である。これらのラン藻類化石は、し



第13.6図 現生及び化石のストロマトライト A. 西オーストラリアの現生のもの、B. 南アフリカの25億年前のもの、C. Aの縦断面。

ばしば、**ストロマトライト** (stromatolite) という特徴的な層状構造を形成している (第 13.6 図)。無機物から複雑な有機物である生命体がいかにしてできあがったかは、良くわかっていない。古くからミラーらの実験で試されているように、メタン、アンモニア、二酸化炭素、および水からなる還元的大気、太陽光や落雷などにさらされると、アミノ酸や単純な有機分子が形成される。しかし、それが実際に起こったことなのか、また、単純なアミノ酸や有機分子からいかに生命体が誕生したかは、未だに謎のままである。

原生代の地球 (25 億～5.42 億年前)

原生代 (Proterozoic) は、太古代の終わりから後生動物の出現までの時代として定義された。実際には、原生代の後期には、原始的な多細胞生物が出現している。原生代は、太古代と顕生累代とを結ぶ重要な時代である。この時代には、非常にゆっくりとであるが、遊離酸素の増加と生物の複雑化が進行した。また、全球凍結事件と呼ばれる、地球全体を氷で閉ざすような大氷河期が、少なくとも 2 回訪れたと考えられている。また、地球上の大陸が一つに集合して**超大陸** (supercontinent) を形成するようになったのも、原生代からのことである。

縞状鉄鉱層と大気中の遊離酸素の増加

太古代の後半から原生代前半にかけて、**縞状鉄鉱層** (banded iron formation: **BIF**) という特徴的な堆積物が形成された。縞状鉄鉱層とは、赤鉄鉱 (Fe_2O_3) や磁鉄鉱 (Fe_3O_4) などの (3 価の) 酸化鉄に富む層と、石英に富む層との繰り返しから成る (第 7.15 図)。世界の主要な鉄鉱床では縞状鉄鉱層を掘っているが、日本には残念ながらこの時代の地層がない。縞状鉄鉱層の出現は、大気中の遊離酸素量が増加して、海水中の鉄イオンが酸化鉄として沈澱するようになったことを示している。遊離酸素量増加の原因は、ラン藻類の光合成とする説が最も有力である。約 22 億年前以降の地層中には、陸上でできた赤土由来の岩石 (赤色層、赤色土層) がみられることもあり、ある程度の量の酸素が大気中に含まれるようになったことを示唆する。



第 13.7 図 最古の真核生物 グリパニア・スピラリス、ループの直径が約 5 mm.

氷河の痕跡

太古代が暖かかったことは前に推定したが、原生代になると地層中に氷河の痕跡が見られるようになる。具体的には、氷河によって削られ運搬された、大小様々な礫を含む礫岩層 (氷成礫岩層) がみられる。特に、今から 22～23 億年前と 6～8 億年前には、地球が赤道域まで凍結する、**全球凍結事件** (snowball Earth event) が起きたと言われている。原生代の寒冷化の原因としては、生物の光合成活動により、温室効果気体である大気中の二酸化炭素の量が減少したことを挙げる研究者が主流である。しかし、後に記すように、別の原因を考える研究者もいる。

超大陸の形成

原生代になって、本格的な大陸が形成されたことは先に述べた。さらに、15～18.5 億年前頃には、当時の大陸地殻の大部分を集めた超大陸**コロンビア** (Columbia) が、7.5～10.5 億年前頃には超大陸**ロディニア** (Rodinia) が形成されたと考えられている。

真核生物の発生

先カンブリア時代の化石の多くは、核や細胞質構造を持たない**原核生物** (prokaryotes: 古細菌や真正細菌) である。逆に、核や細胞質構造を持つ生物を**真核生物** (eukaryotes) と呼ぶ。最古の真核生物は、アメリカ合衆国ミシガン州の



第 13.8 図 最古の多細胞生物? (上) ガボンで発見された多細胞生物と思われる化石 (スケールは 1 cm) と、(下) CT スキャンで作成した断面図。

21 億年前の縞状鉄鉱層から見出されたグリパニアと呼ばれる化石で、単細胞の真核生物が連なって長径 1 cm 程の楕円形の渦巻き（二重巻きが多い）をなしている（第 13.7 図）。また、2010 年には、西アフリカ、ガボンの 21 億年前の地層から、比較的大型（長さ 12 cm）の多細胞生物と思われる化石が発見されている（第 13.8 図）。いずれも、22～23 億年前の全球凍結（ヒューロン氷期）の直後のことであるため、全球凍結と生命の進化との関連性を重視する研究者もいる。一方、中央オーストラリアのビタースプリングスで発見された約 9 億年前の化石には、核の分裂を保存したものがあるといわれる。真核生物の登場により、細胞の減数有糸分裂およびそれに伴う遺伝情報交換の可能性が増加した。多様な生物が登場するための、基礎ができたといえる。

原生代末期の全球凍結事件

原生代末期の氷河の痕跡が、地球上各地に残っており、今から 6～8 億年前には、地球全体が凍りつく事件が、立て続けに 4 回ほど起こったと考えられている。これは、恐らく、地球史上最大の全球凍結事件である。この仮説の根拠は、古地磁気の証拠により当時の赤道地域にあったと考えられる地層から、氷成礫岩層が報告されている事実である。赤道地域が広く氷河に覆われていたことは、全地球が凍結したことを意味すると解釈される。かつては、全地球が凍結すると、氷の反射（アルベド）により太陽が地球を効果的に暖められなくなるので、今日のような暖かい地球には戻り得ない。従って、全球凍結事件は空想に過ぎないという考えもあった。今日では、全球凍結時に火山ガスに由来する二酸化炭素が大気中に膨大に蓄えられ、この二酸化炭素の温室効果で氷が溶け、通常の温暖な地球環境に戻ったと考えられている。氷成礫岩層の直上には、厚い炭酸塩岩（*cap carbonate*）が見られる。全球凍結の寒気を緩めた二酸化炭素が、現在は厚い炭酸塩岩として残されているのであろうか。日本の近くでは、中国東北部から韓国北部にかけてこの時代の地層が残っており、震旦系（*Sinian*

System）と呼ばれている。

多細胞生物の発生

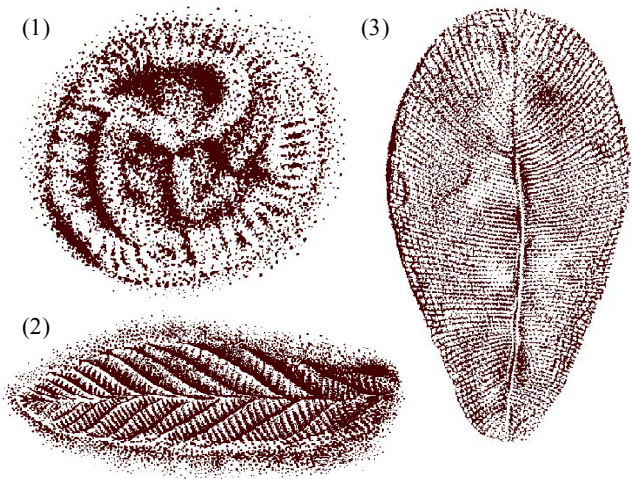
本格的な多細胞動物は、先カンブリア時代末期、今から 6 億年ほど前に登場した。これも、6～8 億年前の全球凍結終了直後のことである。中でも有名なものは、オーストラリアのアデレード市近郊で最初に発見された、**エディアカラ生物群**（*Ediacara biota*）である。現在では、世界の約 20 ヶ所で、カンブリア紀直前の地層から見出されている。もとの生物は、固い殻を持たない多細胞生物であったとみられ、生物が泥底につけた印象のみが化石として残っている。クラゲ、ヒトデ、ゴカイ、ナマコなどに似た形態のものがある（第 13.9 図）が、その生活様式は大きく異なっていたと見られている。

古生代の地球（5.42 億～2.51 億年前）

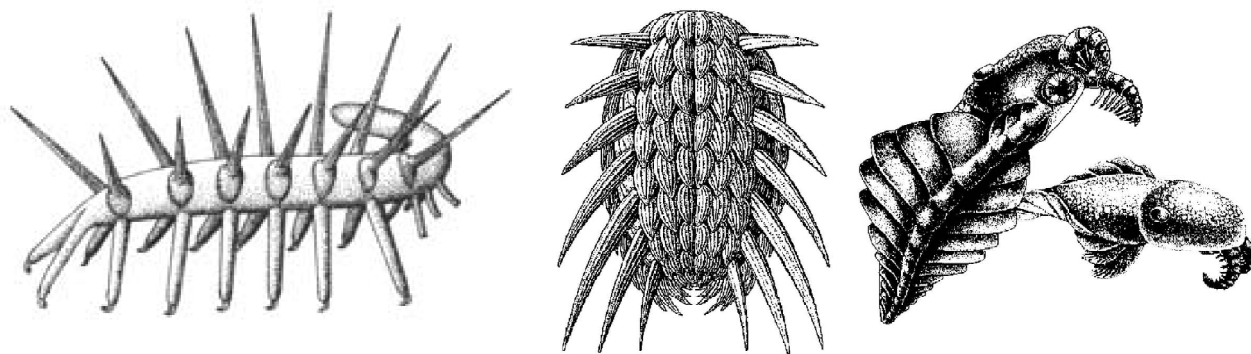
先カンブリア時代が終わり、多様な後生動物の棲息で特徴づけられる時代を**顕生累代**（*Phanerozoic eon*）と呼ぶ。顕生累代は、更に、地層と化石の変化をもとに、**古生代**（*Paleozoic*）、**中生代**（*Mesozoic*）、および**新生代**（*Cenozoic*）に分けられる。古生代は、海の生態系がほぼ確立した時代である。また、初めに植物が、それを追うように動物（両生類）が上陸した時代でもある。

海の生態系

前述の様に、本格的な多細胞動物は先カンブリア時代末期に登場する。それからカンブリア紀中期にかけて、生物は海中の様々な環境や生活形態（生態学的地位＝*ecologic niche* と呼ぶ）へ適応し、様々な体制を取りながら爆発的に広がっていった。その結果、今日見られる生物の「門（分類カテゴリーの一つ）」が出揃った。この一連の短期間（とはいえ、1 億年ほど）の出来事を、**カンブリア紀大爆発**（*Cambrian explosion*）と呼ぶ。この「大爆発」の最中に、現世の生物や地質時代の化石とはかけ離れた形態をもつ生物が棲息していたことが知られている。有名なものとし



第 13.9 図 エディアカラ生物群 左：採取風景；右 (1) トリブラキディウム（直径 2.5 cm）、(2) チャルニア（長さ 18 cm）、(3) ディッキンソニア（長さ 20 cm）。



第 13.10 図 パージェス動物群 左: ハルシゲニア, 中: ウィワキシア, 右: アノマロカリス.

て、カナダのブリティッシュ・コロンビア州に分布する、中期カンブリア紀の**パージェス頁岩** (*Burgess shale*: 頁岩とは、層理面に沿って割れやすい泥岩) 層から産するパージェス動物群が挙げられる。厚さわずか 2 m の本頁岩層は、節足動物や、固い殻を持たないナメクジウオ、環形動物 (みみず類) などの保存良好な化石を多産する (第 13.10 図)。また、中国雲南省の澄江動物群は、パージェス動物群以上に多様な化石を含み、注目されています。他の時代にも、保存されていない同様な生物が多数いたとする見方もあるが、当時、多種多様な生物が爆発的に発生し、かなりの種属が淘汰されたという見方が有力である。

生物の上陸と地球環境

最初の陸上植物は、アラビア半島オマーンのオルドビス紀 (4.75 億年前) の地層から報告されている。陸上植物は、光合成に用いる水を摂取する器官 (例えば根の様な) と、重力に耐える体の構造を備える必要がある。当初は、陸上を這う形の植物が多かったが、デボン紀頃から高い木が発達を初め、石炭紀には文字通り石炭を作るような森林が発達したと考えられている。お隣の韓国や中国には、石炭紀の高品質な炭田がある。また、デボン紀の地層からは、節足動物や両生類など、陸上動物の化石を産するようになる。デボン紀頃には、成層圏のオゾン (O_3) 層が形成され、有害な紫外線から陸上の生物を守るようになったと考えられている。

超大陸ゴンドワナ (パノティア) とパンゲア

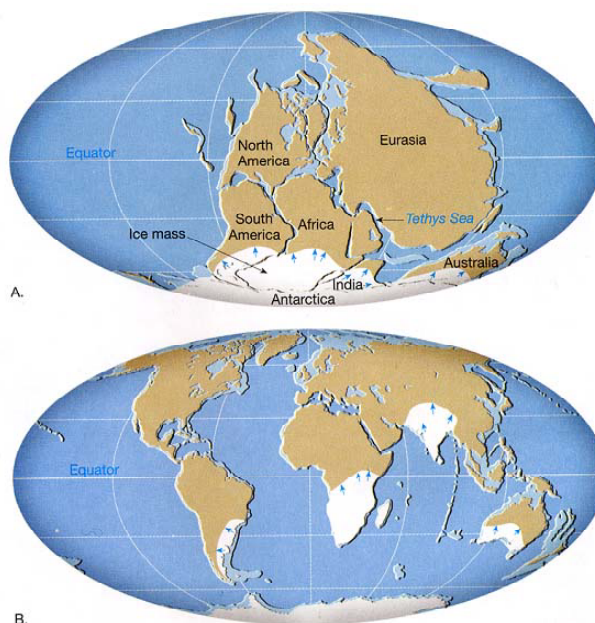
パンゲアの分裂後に残された最大の大陸を、**ゴンドワナ** (*Gondwanaland*) と呼ぶ。南米、アフリカ、インド、南極、オーストラリア等、インドを除いては現在の南半球にある大陸が集まった超大陸である。ゴンドワナ大陸は、パンゲアをなしていた他の大陸塊とともに、5.5 億～4 億年前にパノティア (*Pannotia*) という超大陸をなしていたという説もある。パノティア説はまだ仮説の段階を出ないが、その後、3.5 億～1.7 億年前に世界の大陸が一つの超大陸**パンゲア** (*Pangaea*) を成したのは確かなことと考えられる。大陸移動説で有名な**アルフレート・ウェゲナー** (*Alfred Wegener*) は、多くの地質学的証拠を総合して、パンゲアが存在を裏付けた。

古生代の氷河期

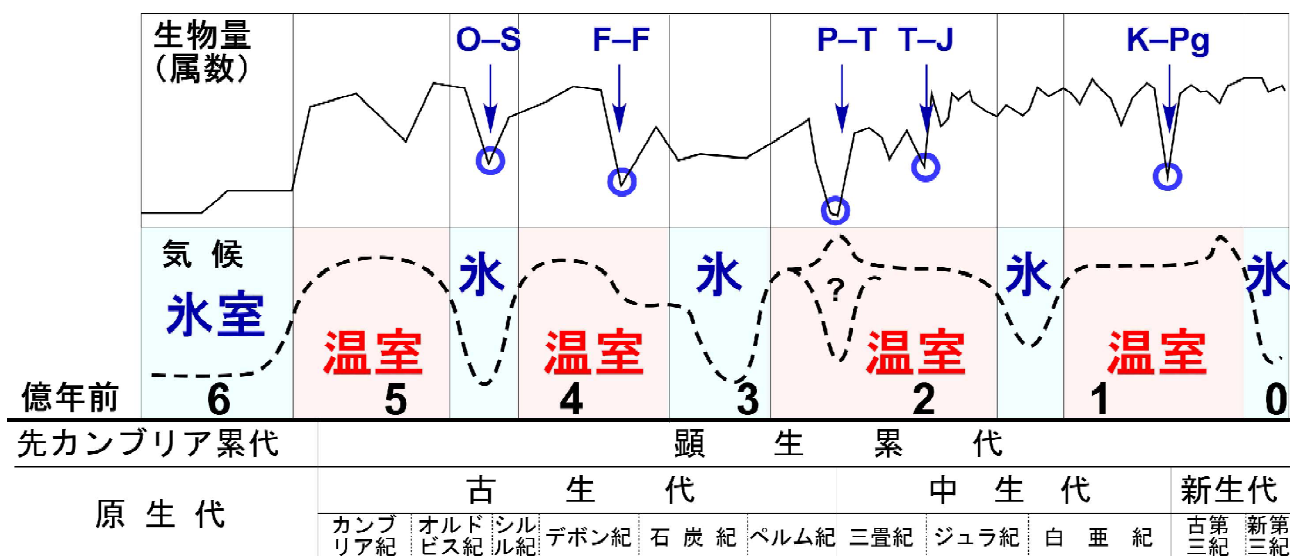
ウェゲナーがパンゲア存在の根拠とした事実の一つとして、南米、アフリカ、インド、南極、オーストラリアに散在する、石炭紀 (約 3 億年前) の氷河堆積物が挙げられる。氷河堆積物は、現在の南極から北緯 20° の広い範囲で見られるが、前述の様に、石炭紀には森林が発達した地域があるのも事実なので、全球凍結が起きたとは考えられない。ウェゲナーは、超大陸パンゲア存在を仮定することで、石炭紀の氷河の痕跡が一ヶ所に集まることを見出した (第 13.11 図)。石炭紀の氷河は、南極から南緯 40° 付近までを覆っていたと見られており、第四紀の氷河期と同等か、より寒冷であったようである (北緯 40° は、ニューヨーク、秋田、北京、アンカラ、マドリード付近)。また、古生代には、オルドビス紀後期～シルル紀前期に急激な寒冷化が起こったと見られている。更に、近年では、古生代末期にも急激な寒冷化が起こったと考える研究者もいる。

生物の大量絶滅事件

顕生累代には何回か、生物の**大量絶滅** (*mass extinction*)



第 13.11 図 氷河堆積物から見た石炭紀の氷河分布 A: 復元されたパンゲア上での分布, B: 現在の大陸配置における分布.



第 13.12 図 過去 6 億年における、地球の気温(炭酸塩岩中の酸素同位体比 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ からの推定)および生物量の変化 6 億年間に 4 回の氷河期があり、現在は 5 回目の氷河期にいる。生物界は、5 回の大量絶滅を経験した。

が起きている。特に顕著な大量絶滅事件は 5 回あり、古生代、中生代といった「代」の 2 回の境界は、当然ながらその中に含まれる(第 13.12 図)。最初の事件は、オルドビス紀—シルル紀(O-S)境界で起きており、急激な寒冷化が重大な要因になったと見られている。次の事件は、デボン紀のフラスヌ期—ファメンヌ期(F-F)境界で起きており、海洋生物種の 80% が絶滅する大事件であったにもかかわらず、その原因は特定できていない。3 回目は古生代(ペルム紀)—中生代(三畳紀)(P-T)境界で起きており、地球史上最大の大量絶滅事件として知られている。海洋生物種の 96% が絶滅した大事件である。日本を初めとする環太平洋地域各地には、古生代—中生代境界付近の大洋底の地層がよく保存されており、研究が進みつつある。日本の古生代—中生代境界では、一般に酸化的な大洋底の地層の中に、非常に還元的な環境を示唆する炭質な泥岩層が薄く挟まれている。古生代—中生代境界時の海底は、一時期非常に還元的な無酸素状態になり、それが生物の大量絶滅と関わっていると考えられる。ただ、その**超無酸素事件(Superanoxia)**の原因には諸説ある。また、ニュージーランドでは日本よりやや遅くに大量絶滅が起きた証拠が見出されてきており、問題を更に複雑にしている。

中生代の地球(2.51 億～6,550 万年前)

中生代は全般に温暖な時代で、地球の様子は以下の様であったと考えられている。

巨大爬虫類の時代

古生代の後期から陸上に姿を現した爬虫類は、中生代になると大型化して、地表生態系の頂点に立った。爬虫類の体は鱗で覆われ、卵も固い殻をもつため、両生類よりも、温暖で乾期のある中生代の気候に適応している。特に、ジュラ紀から大型化した恐竜、特に大型肉食恐竜は、地上の食物連鎖の頂点に立った。また、海中を泳ぐ魚龍や、空

を飛んだと見られる翼竜など、種々の生活様式をとる爬虫類が知られている。

白亜紀の海進と活発な火成活動

中生代後期の白亜紀は、顕著な海進と、非常に活発な火成活動で特徴づけられる時代である。例えば、白亜紀には、現在より数倍速い速度で太平洋の地殻が形成されていたことがわかっている。大洋地殻形成速度の増加に伴い、大洋プレートの沈み込みも活発になり、日本でも、大洋プレートの沈み込みに伴う、白亜紀の地殻変動や火成活動が非常に活発になっている。また、大洋地殻の量が急増したことが、白亜紀の海進をもたらしたと考えられている。

中生代の大量絶滅

中生代の前半、三畳紀—ジュラ紀(T-J)境界に、地球史 4 回目の大量絶滅事件が起きている。ここでは、三畳紀型アンモナイト(セラタイト)や、大型爬虫類・哺乳類型爬虫類のいくつかの系統など、全生物種の 70% が絶滅したと考えられている。一方、白亜紀—古第三紀(K-Pg)境界には、恐竜を初めとする動物の大量絶滅が起こっている。やはり、全生物種の 70% 程が絶滅したと考えられている。大量絶滅の原因としては、異常に規模の大きい火山活動(実際、この時期に、インドのデカン高原で大規模な玄武岩の噴出があり、「洪水玄武岩」と呼ばれている)による気候変動や大気組成の変化、白亜紀後期に増加した顕花植物に含まれるアルカロイド(alkaloid)の一部がもつ毒性(哺乳類には無害)などを挙げる研究者もいる。しかし、現在の多数意見は、小惑星または隕石の衝突説である。白亜紀—第三紀境界の地層は、北米やヨーロッパの各地に保存されているが、そこには、地球表層部にはほとんどないはずのイリジウム(Ir)の濃集が見られたり、融けた地殻物質が飛び散ってきたと考えられるガラス小球が見られたりする。これらの物質は、衝突説を支持する。ま

た、15 年ほど前には、メキシコのユカタン半島先端の**チクシュルブ** (Chicxulub) で、その時代の隕石孔 (地質過程により、現在は埋め立てられている) が発見された。

新生代の地球 (6,550 万年前以降)

新生代は、爬虫類に代わって哺乳類が地表の支配者となった時代である。新生代は、その前半期が非常に温暖な時代であったものの、1,200 万年前頃から徐々に寒冷化し、氷河期に入った。現在は、間氷期という穏やかな時期にいるが、間氷期にも比較的頻繁に気候変動が起こっている。

最終 (ヴェルム) 氷期の終了

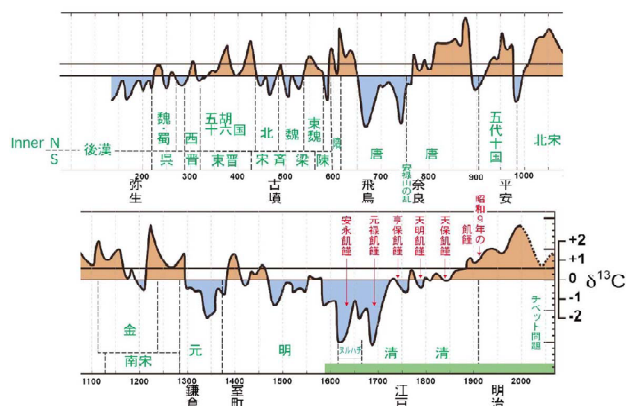
最終氷期は、18,000 年前頃にピークを迎え、北米ではニューヨークーシアトル線以北、ヨーロッパではロンドンーキエフ線以北が大陸氷河に覆われた。その後、地球は次第に温暖化したが、12,000 年前頃に**ヤンガー・ドライアス** (Younger Dryas) という亜氷期を経験して、10,000 年前頃から現在の間氷期に入った。

縄文海進

現在の間氷期に入って気温は徐々に上昇し、7,000 ～ 5,500 年前には、**ヒプシサーマル** (hypsihermal) と呼ばれる高温期に入った。当時の気温は現在よりも高く、海進により、関東平野などの海よりの平地は海面下に沈んだ。この時期は、日本の縄文早期～前期にあたるため、この海進を日本では縄文海進と呼ぶ。

過去 2,000 年の気候変動

過去 2,000 年間の気候変動は、屋久杉の年輪 1 枚 1 枚の炭素同位対比を測ることにより推定されている。炭素 13 という同位体は、地球上の植物の光合成活動が活発であればあるほど増える傾向にあるため、上記の方法で気候変動が推定できる。それによると、西暦 800 年 (平安時代最初期) 頃までは比較的寒冷な気候だったが、それから西暦 1,300 年 (鎌倉時代中期) 頃までは比較的温暖な気候が続き、現在よりも温度が高い時期もあった。その後、西暦



第 13.13 図 屋久杉中の炭素同位体 (^{13}C : 当時の地球上での光合成の活発さを反映する) から見た過去 2,000 年間の気候変化
詳しくは、本文を参照のこと。

1,680 年頃 (江戸時代前期) をピークとする長い寒冷期が続いた。室町時代後半から戦国時代にかけての日本の混乱の背景には、この時期の寒冷化があったのかも知れない。また、ヨーロッパでは、同時期にロンドンのテムズ川の凍結などが記録されており、この時期を**小氷期** (Little Ice Age) と位置づけている。西暦 1,680 年頃から、世界の気温は大局的には上昇の一途を辿り、今日に至っている。

環境変化の原因

ここまで、地球環境変化について色々と記してきた。次に、環境変化の原因として考えられていることを、ここに簡単にまとめる。もちろん、現実には、複数の要因が環境変化に影響を与えていることは言うまでもない。

温室効果気体

現在の地球の平均気温は約 15°C であるが、温室効果気体がなければ -18°C になると言われている。温室効果がそれ程重要であるのは事実であるし、世界中の耳目が地球温暖化に集まる現状から、過去の環境変動の原因を温室効果気体に求めたくなるのは人情である。しかし、地球史上の主要な環境変化を、全て温室効果気体の増減で説明するのは難しいと、個人的には考えている。温室効果気体 (主に二酸化炭素) を増減させる機構として、今のところ以下のものが想定されている：

- ・増加：火山ガスの噴出、有機物の分解・燃焼、メタン・ハイドレートの融解
 - ・減少：水中への溶解、光合成による有機物の生成、 CaCO_3 の生成、岩石の風化による重炭酸イオンの生成
- $$2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + \text{MgSiO}_3 \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$$

温室効果気体を、気体の状態で置くか、固体またはイオンの状態にするかの問題である。全球凍結も、岩石の風化から発生させるというのが定説であるが、本当にそこまで可能か、定量的な吟味は未だなされていない。また、西暦 800 年～1,200 年の温暖化や、西暦 1,680 年をピークとする小氷期も、温室効果気体の増減で説明できか不明である。

太陽活動

太陽活動が地球の環境に影響を与えることは、直感的に理解できる。太陽の活動度は、黒点数の多さが指標となる。望遠鏡を用いた太陽の黒点観察が始まったのは、西暦 1,600 年頃のことであるが、その直後の 1,645 年～1,715 年に、70 年間で黒点がわずか 50 個体しか数えられない時期が訪れた。この時期を、**マウンダー極小期**と呼ぶ。この時期は、西暦 1,680 年をピークとする小氷期と奇しくも一致する。わずかに一例なので何とも言えないが、21 世紀になって太陽黒点数が減少していることから、今後の寒冷化を危惧する声もある。

火山活動

火山活動が環境変化に及ぼす影響は、2 通り考えられ

る。1つは温室効果気体の放出による地球温暖化であり、もう1つは多量に噴出した火山灰が成層圏で太陽光を遮ることに起因する寒冷化である。寒冷化の例として、江戸時代の天明の大飢饉は、アイスランドのラキ火山とグリーンズヴォトン火山の大噴火に加えて、浅間山の大噴火が起こったための冷害と言われている。また、フィリピンのピナツボ火山大噴火の後、平成5年(1993年)の冷夏が訪れ、“平成米騒動”が起こった。

天体としての地球の運動

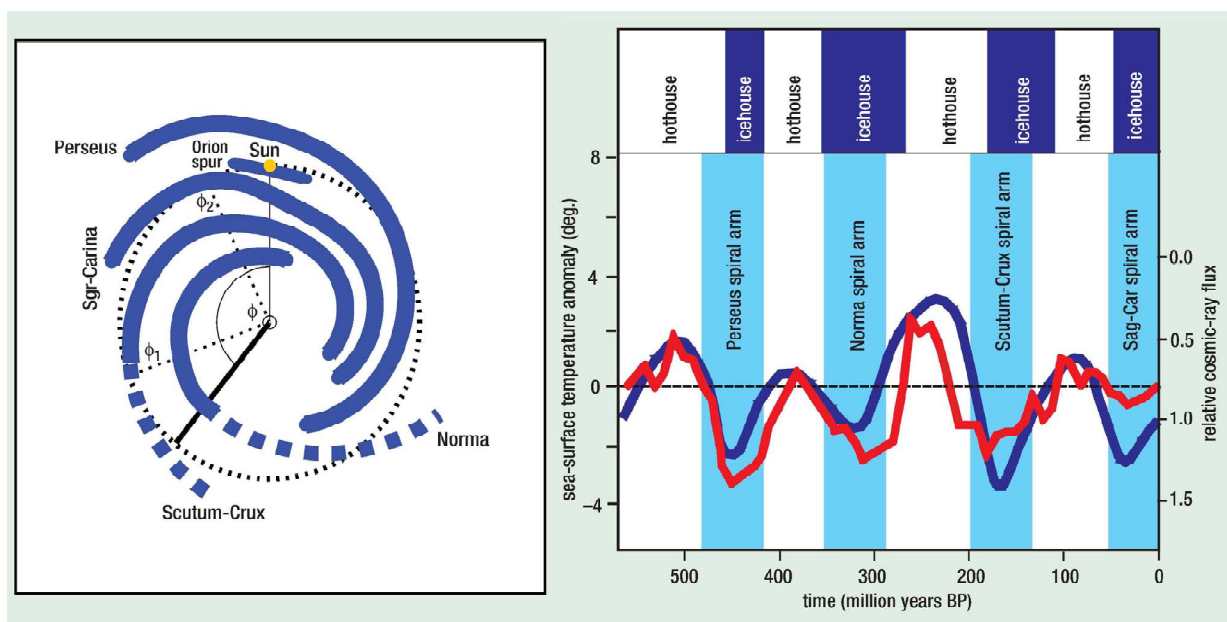
セルビア人科学者のミランコビッチ(1879-1958)は、地球の公転軌道面と自転軸の長期的変化によって、太陽と地球との位置関係が変化し、地球上に入射する太陽放射の量及び分布が変化することを示した。特に、①地球公転軌道の離心率(10万年周期)、②地軸の傾きの変化(4.1万年周期)、および③地球自転軸の歳差運動(2.2万年周期)が、太陽放射量の周期的変化をもたらすと考えた(第9.11図)。実際、過去100万年ほどの気温変化は、上記3周期の重ね合わせでうまく説明できるという説もある。特に、7,000~5,500年前の高温期(ヒブシサーマル)は、地軸の傾きが最も大きく、高緯度地域が効果的に暖められた時期だと言われている。

宇宙線量

宇宙空間から地球へ飛び込んでくる高エネルギー放射線を、宇宙線と呼ぶ。宇宙線は、雲の凝結核となるため、宇宙線量の増加により、特に低層(高度3,500m以下)の雲量が増え、地球が寒冷化する可能性が指摘されている。地球磁場が強かったり、太陽活動が活発だったりすると、宇宙線の地球への侵入は妨げられる。逆に、地球磁場や太陽

活動が弱まったり、地球が、超新星など宇宙線の発生源に近づいたりすると、地球へ降り注ぐ宇宙線量は増加する。このことに関連して、スウェーデンのスヴェンスマークという天文学者は、**銀河系内での太陽系の運動**が億年単位の地球の環境変化に影響を与えていると考えた。銀河系は4本の“腕(星の多い部分)”をもつ星雲で、太陽系は、その周縁部を約6億年かけて周回している。腕の部分は、星の分布密度が多いため、宇宙線の発生源も多いと推定される。過去6億年で、地球は4回の氷河期を経験し、今5回目の氷河期の最中にいる。この氷河期は、太陽系がまさに銀河系の腕の部分を通じた時期に当たるとのことである(第13.14図)。スヴェンスマークはさらに、銀河系内で新星形成が活発だった時期(スターバースト:star burst)が、22億~23億年前と、6億~8億年前(大マゼラン雲と銀河系が一部衝突)であることを示し、スターバーストの時期と大氷河時代(全球凍結を含む)および生物多様性の増加する時代との間に強い相関性があることを示した。彼の解釈によると、スターバーストに起源をもつ宇宙線により、地球上の低層雲量が増加して大氷河時代となり、同時に宇宙線が生命体に作用して新種の生物(真核生物および後生動物)を生んだということである。まだ、萌芽的なアイデアの段階であるが、非常に壮大で総合的な地球環境変動論と言える。

以上のように、まだ十分検証されていない説ばかりであるが、個人的には、天文学と環境科学や生物学が関連していると考えると、自然の奥深さに驚かされるとともに、心躍る気がする。地球科学や環境科学の問題を考える際には、様々な手法で様々な時空間から得られたデータを、**総合(synthesize)**していく作業が非常に重要になる。



第 13.14 図 銀河系を周回する太陽系の模式図(左)と宇宙線量及び気温の相関関係(右) 左図の太陽の位置(Sun)が、右図の左端(約6億年前)にあたる。現在の太陽の位置は、 ϕ_2 付近。右図の青い曲線は宇宙線量(下方ほど多い)を、赤い曲線は酸素同位体から見た地球大気の温度(上方ほど高い)を示す。