

1 序論

1.1 地球史研究の意義

私たちはどこから来て、どこへ向かおうとしているのか
宇宙はどうなっていて、地球に何が起こり、人間は何故生まれて来たのか。これから人間を取り巻く環境はどう変わって行くのか。

これからどう生きるべきか
近年、人間が地球環境と関わる問題が急激に顕在化。近い将来地下資源が枯渇する可能性もある。人間は地球の中で生き残って行けるのだろうか？地球環境問題を解決するためには、人間を含めた地球の理解（過去、現在）が不可欠。

1.2 生命と地球の共進化

普通の地球科学の研究者は地球の一部を研究し、学問分野毎に棲み分け（学）。しかしながら、地球は縫目のない織物である。地球を一つの惑星として、総合的に研究する。

生物と地球は相互に密接に影響し合いながら共に進化して来た（「生命と地球の共進化」）。生物は光合成や呼吸を通して地球環境を変え、地球環境の変動により生物は繁栄と絶滅を繰り返して来た。したがって、地球を理解するためには、生物圏を含めて地球を一つのシステムと見なし、その変動メカニズムを明らかにする必要がある。

1.3 地球史セミナーの目的

生物と地球環境の歴史について学ぶ。
最近の地球史研究は新たな展開を見せているらしいが、研究はどこまで進んでいて、何が問題かを知る。第 1 回は『生命と地球の共進化』（川上 2000）を基に、地球史の概論を解説する。

地球史に関する幅広い知識や発想を身に付け、自分の研究に活す。
自分が専門的にやっている/やろうとしていることと、必ずどこかで結び付くはず。惑星を知ろうとするからには、地球のことに詳しくなる。

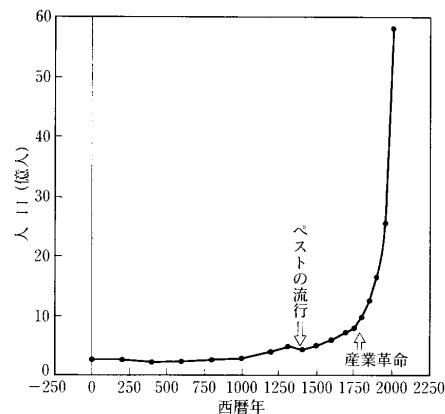


図 1: 世界人口の推移. 岩波講座 地球環境学 1 巻より.

2 地球史概観

地球の歴史の組み立て方

地層 (= 過去の歴史を記録したテープ) を読み解く。古い時代ほど研究は進んでいない。特に化石の産出しない時代 (先カンブリア時代, 46 億年前から 5.4 億年前) の研究は 1970 年代以降からようやく始まる。なぜ 5.4 億年以前の地層から化石が産出しないのかは不明 (進化のカンブリア爆発)。

化石の産出しない時代の区分: 先カンブリア時代 (始生代 + 原生代)

化石の産出しない先カンブリア時代は 3 つの時代に区分。

冥王代 (46 億年前)

太古代 (40 億年前)

原生代 (27 億年前) [前期-中期-後期]

冥王代は地質的記録 (岩石) のない時代。太古代-原生代境界の年代には議論がある。

化石の産出する時代の区分: 顕生代

産出する化石の種類によって地質時代に区分。キュビエ (18 世紀 フランス) は化石の種類に基づいて、過去の時代を第一紀-第二紀-第三紀 (ほ乳類)-第四紀 (人類) に分類。それぞれの時代の終りに生物の大量絶滅があり、その都度新たに生物が創造されたと考えた (天変地異説)。しかし、その後の研究では無視。現在ではキュビエの分類を変更して、

第一紀: 古生代 (5.4 億年前) [カンブリア紀-オルドビス紀-シルル紀-デボン紀-石炭紀-ペルム紀]

第二紀: 中生代 (2.5 億年前) [三畳紀-ジュラ紀-白亜紀]

第三紀, 第四紀: 新生代 (6.5 千万年前)

に分類。生物種の移り変わりが地質時代の境界を決める。

生命/地球史の 7 大事件

生命史, 地球史の分野で独立に提案。しかし興味深いことに、それぞれの事件は時期的に近い。「生命と地球の共進化」という概念が誕生。

(E1) ~ 46 億年前, 地球が形成された。

(E2) ~ 40 億年前, 最古の地殻物質が保存されるようになった。

(E3) ~ 27 億年前, 火成活動が活発化し, 大きな大陸ができた。

(E4) ~ 19 億年前, 著しい火成活動があり, 巨大な大陸が始めて形成された。

(E5) ~ 6 億年前, 超大陸が分裂して新しい海洋が形成され, 多細胞動物が始めて出現した。

(E6) ~ 2.5 億年前, 超大陸が形成され, 海洋の酸素欠乏事件によって, 生物界で大量絶滅があった。

(E7) 現在, 人間が科学を発明し, 地球と宇宙の歴史とその摂理を探り始めた。

(L1) ~ 40? 億年前, 生命が誕生した。

(L2) ~ 35? 億年前, 代謝が始まった。

(L3) ~ 27 億年前, 光合成と化学合成が始まった。

(L4) ~ 20 億年前, 真核生物が登場した。

(L5) ~ 6 億年前, 多細胞生物が出現した。

(L6) ~ 4.5 億年前, 生物が陸上へと進出した。

(L7) ~ 100 万年前, 人類が誕生した。

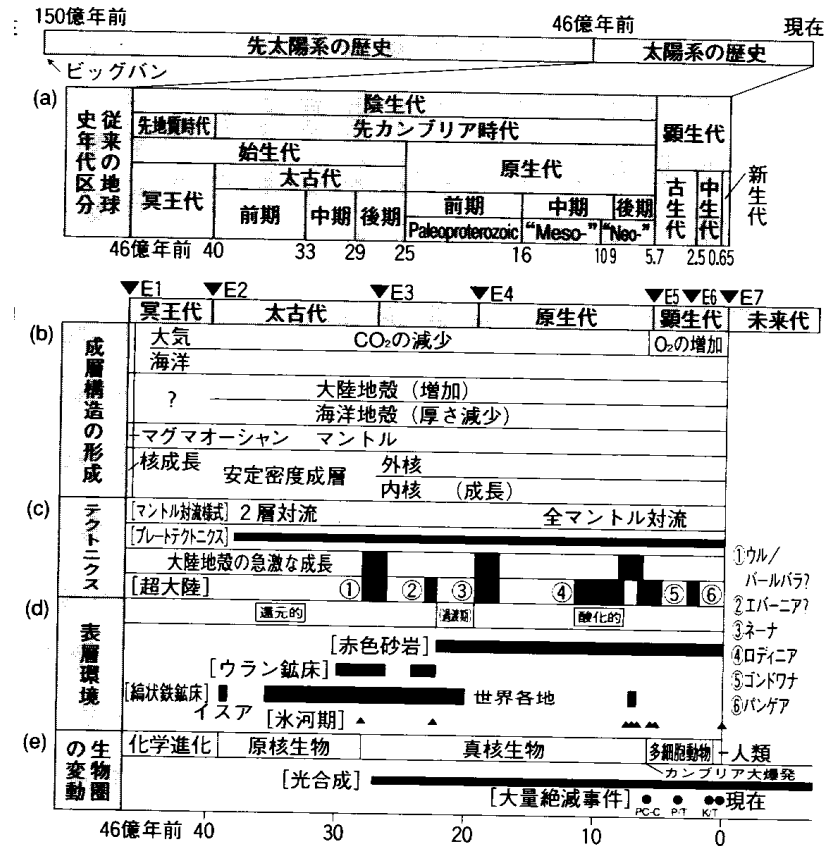


図 2: 地球史年表. (a) 従来時代の区分, (b) 地球史 7 大事件に基づく時代区分. 川上 (2000), p 33.

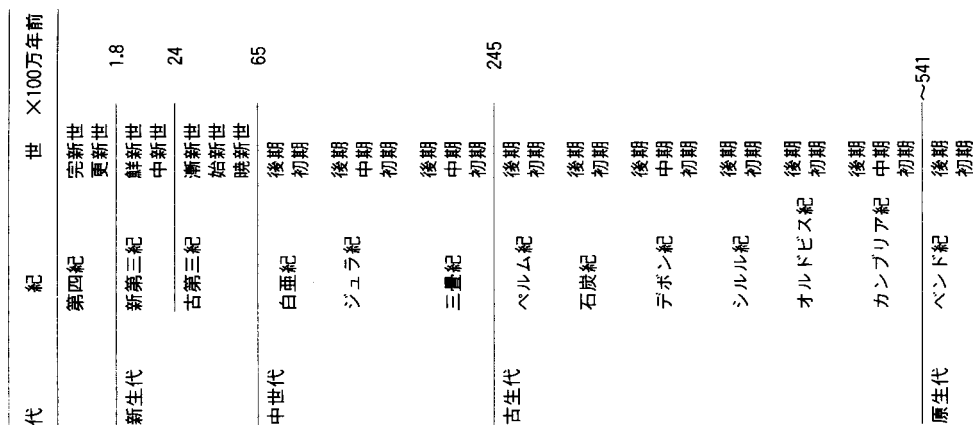


図 3: 顕生代の地質時代区分. 川上 (2000), p 32.

3 冥王代 (Hadean)

地質記録 (岩石) の残っていないブラックボックスの時代 (46 – 40 億年前). このため理論・モデル計算が重要 (地球初期進化研究). 惑星形成論によって得られた標準的な惑星形成シナリオを初期条件として, 地球初期進化研究は 1980 年代に飛躍的に発展.

惑星系の形成

46 億年前, 太陽系の近くで起こった超新星爆発がきっかけとなって巨大な星間雲が収縮し, 原始太陽が形成. 原始太陽の中心部が高温になることにより核融合反応が起こる. 原始太陽の赤道面上にはガスと塵からなる原始太陽系円盤が形成され, 重力不安定が生じて微惑星が形成. 微惑星の衝突により原始惑星が成長し, 惑星が形成される.

地球初期進化のシナリオ

微惑星が原始地球に衝突することにより原始地球物質 (+ 微惑星物質) が放出され, 揮発性物質は原始地球を覆う (衝突脱ガス). 原始地球の大気は, 衝突脱ガスかあるいは原始惑星系円盤のガスを取り込むことによって形成. 固体地球は集積過程で融解 (マグマオーシャン). この融解の原因は原始大気の保温効果によるかも知れないし, 比較的大きな微惑星の衝突によるかも知れないし, 集積末期のジャイアントインパクトに伴う破局的な融解であるかも知れない. 大規模な融解が起こるとマグマオーシャンの中の金属鉄が重力分離し, 地球中心に落下することでコアが形成. 親鉄元素はコアに分配される. 原始地球の冷却にともない原始大気中の水蒸気が凝結し原始海洋ができる. またマグマオーシャンでは部分熔融状態で固液分画が起こることでマントル-地殻の分化が進行する. この時期に大気の散逸も進むかも知れない. またジャイアントインパクトがあれば大気の一部は失われる. 微惑星の地球集積がほぼ終了した後も微惑星の衝突は継続し, この衝突で大気と原始地殻は大きな影響を受ける.

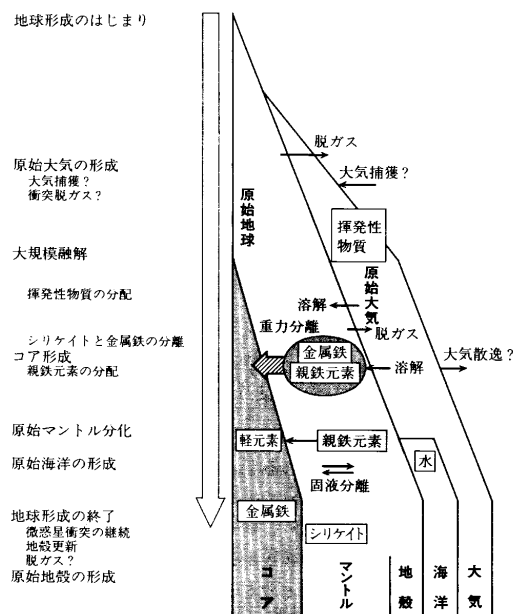


図 4: 地球初期進化の概念図. 岩波講座 地球惑星科学 13 巻.

4 太古代 (Archean)

最古の岩石 (40 億年前) が発見されて以降の時代が太古代。始生代とも呼ぶ。太古代の終りの年代には議論がある。便宜的に 25 億年前と定義するのが一般的だが、「全地球史計画」では大きなイベントのあった 27 億年前を新たな境界とすることを提唱している (図 2)。

40 億年前には最古の生命が誕生し, 38 億年前には海洋が存在し, プレートテクトニクスが始まり, 35 億年前には原核生物が出現したと考えられている。太古代の生命と地球の歴史に関しては, 丸山と磯崎 1997 に詳しい。

生命の起源論

- 20 世紀初頭: オパーリン, ホールデン
原始海洋で有機物のスープができ, 簡単な有機物から複雑な有機物が合成されて生命が誕生 (化学進化説)。
- 1950 年代: ユーレイ, ミラー
当時の塵芥惑星形成説 (原始惑星に塵が徐々にふりつもり惑星ができたとする説。形成期の惑星は暖かにならない) によると, 初期地球の表面には金属鉄が豊富に存在。このため初期地球では還元的大気が化学的に安定。原始大気は還元的水素, メタン, アンモニア (原始太陽系星雲起源)。還元大気中で放電を行うと, 有機物が合成。
- 1970 年代以降: 酸化的初期大気説
地球表層の揮発性元素, 希ガスの測定値が原始太陽系星雲ガスの組成とは異なることが判明 (地球表層は希ガス成分が乏しい)。むしろ火山ガス組成に似ていることから, 原始地球大気は地面からの脱ガスによる酸化的大気説が有力。酸化大気中での放電では有機物は微量しか合成されないため, 有機物宇宙起源論が有力候補に。1986 年のハレー彗星観測では, 彗星核に大量の有機物が存在することを示唆するデータ。隕石中に有機物が存在するデータ。
- 現在の生命の起源論
メタンに富んだ原始大気が存在すれば, アミノ酸や核酸の合成に必要なホルムアルデヒドやシアン化水素が光化学反応で合成。逆に分子状酸素 (紫外線による水分子の光解離によって生成) が存在すれば有機物は合成されない。原始大気中のメタン, 酸素量が問題。「地球化学サイクルモデル」の構築が必要。

38 – 35 億年前: 地球最古の岩石を用いた地質学的研究

- 38 億年前の生命活動の痕跡 (Schidrowski 1998)
生命が無機物を材料に有機物を合成する場合には, 酵素反応によって選択的に質量数の小さい炭素 (^{12}C) を利用。炭素同位対比から, 生物的に作られたものと無機的に作られたものの区別可能。ドイツのシドウスキーらは, この点に着目してグリーンランド・イスア地域グラファイトの炭素同位対比を測定。 δ 値 (標準試料からの偏差) がマイナス 12 ‰であることから, 38 億年前に原核生物が存在したことを主張。しかしながら, 炭素同位体だけでは確かなことは言えない。

- 38 億年前, すでに海洋が存在し, プレートテクトニクスが始まっていた (丸山 1993)
 イスア地域に付加体と枕状溶岩を発見. 付加体は海洋性プレートに堆積した堆積物が上盤側のプレートに付加してできる地質体であり, プレート運動の証拠と考えられる. また枕状溶岩は溶岩が海洋底から噴出することにより形成されるため, 海洋が存在した証拠と考えられる.
- 35 億年前の最古の原核生物様化石の発見 (丸山と磯崎 1997)
 西オーストラリアのビルバラ地域のチャート層 (細かい石英粒子が層状に堆積した岩石. 新しい時代のチャート層は放散虫という微生物の遺骸が堆積) から, 最古の原核生物様化石を発見. また同じ地域の玄武岩中の炭酸塩鋳物量から, 原核様生物化石が存在したのは水深 1000 m 以上の海底であることを推定. 初期の原核生物が深海底の熱水活動域に生息していたことを示唆.

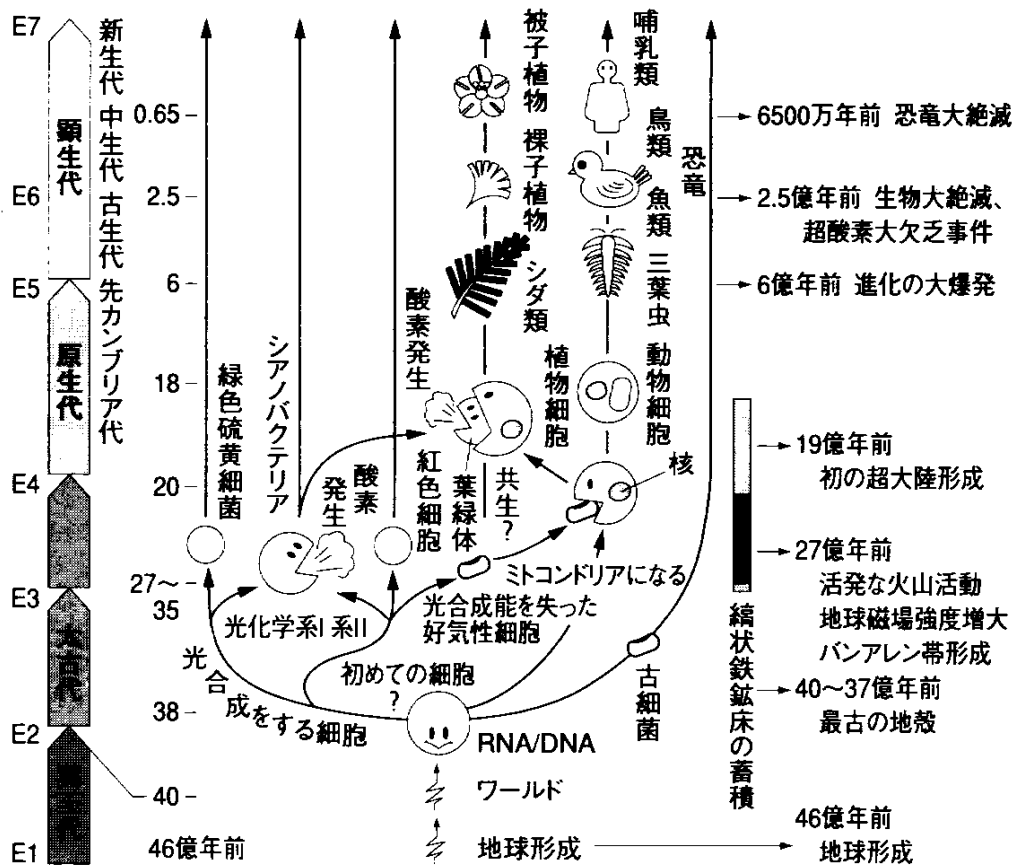


図 5: 生命/地球史年表. 川上 2000, p 108.

5 原生代 (Proterozoic)

原生代 (27 億年から 5.4 億年前まで), おそらく地球環境は激変した. 考えられているシナリオによると, 原生代前期の 27 億年前と 19 億年前に固体地球に大きな変化が起こり, 27 億年前に酸素発生型光合成生物の出現し, 22 億年前に全球凍結と大気中酸素濃度の増加が起こり, 21 億年前に真核生物が出現した. 原生代中期に, 巨大大陸は離合集散を繰り返した. 原生代後期の 10 億年前に多細胞生物が出現し, 9 億年前に全球凍結, 6 億年前に生物進化の大爆発が起こった.

5.1 原生代前期 (Paleoproterozoic): 27 億年前

27 億年前

- 火成活動の活発化と大陸の急激な成長

熊澤仮説によると, 地球形成期に核とマンツルの分化が起こったが, 地球の成長とともに温度と圧力が高くなるので, 核の外側ほど軽元素が濃集しており, 核は安定成層. このような核で発生する慣性重力波 (安定成層した流体に起こる波動) の周波数が潮せきの周波数と一致すると, 共鳴が起こる. 共鳴によって安定成層していた核に対流が生じ, 地球磁場強度が急激に増加する. 27 億年前の地球磁場強度の増大は古地磁気学により発見. 慣性重力波と潮せきの共鳴は潮せき摩擦を生じさせるため地球内部に熱が発生, マンツル対流が活発化. これが大規模な火成活動と大陸成長を促す.

- 酸素発生型光合成微生物 (シアノバクテリア) が広範囲に渡って生息

最古の生命は深海底の熱水活動領域などに存在. 無機物の酸化還元反応によってエネルギーを得る仕組みを獲得 (化学合成生物). しかしこのようなエネルギー資源は持続的に得ることが難しい. そこで光のエネルギーを得る光合成生物が登場. 始原的な光合成生物は光エネルギーを獲得して従属的に生きていたか, 光のエネルギーを利用して硫化水素を参加して生きていた (非酸素発生型光合成生物). その後, 水と二酸化炭素から有機物を合成し酸素を発生する生物, シアノバクテリアが登場 (酸素発生型光合成生物). シアノバクテリアの光合成は非酸素発生型光合成生物である緑色硫黄細菌, 紅色硫黄細菌の光合成の仕組みが合体して成立. 過去におけるシアノバクテリアの存在を示唆する地質学的証拠はストロマトライト. ストロマトライトは, シアノバクテリアの分泌する粘液に石灰質の固体微粒子が付着してできたドーム状堆積岩で, 27 億年前の西オーストラリア・フォーテスキュー層から産出. シアノバクテリアは大陸の急激な成長によってできた海岸域で繁殖し, 波打ち際で盛んに光合成をしていたと考えられている.

27 – 20 億年前

- 地球の酸素汚染 (27 – 20) と縞状鉄鉱床の謎

シアノバクテリアの出現は地球史で最大の環境汚染を招く (分子状酸素は絶対嫌気性生物にとって有毒). 発生した酸素はそのまま大気に蓄積されたのではなく, まず周辺に存在していた還元的な物質を酸化 (海洋中の二価鉄イオンが酸化され水酸化鉄となって沈澱). これにより大気への酸素蓄積はゆっくりと進み, 海水中の二価鉄イオンが乏しくなった時点 (22 – 20 億年前) で大気中の酸素分圧は急上昇 (鉄の晴れ上がり説). 海底に沈澱する水酸化鉄によ

て大規模な縞状鉄鉱床 (25 – 19 億年前) が形成. しかしながら縞状鉄鉱床は 38 億年前のイヌア岩石にも存在. 太古代の縞状鉄鉱床はどうやってできたのか?

- 地球の酸素汚染のもう一つの可能性: 全球凍結事件 (22 億年前)
22 億年前に全球凍結事件が起こって生物圏の活動は弱まったが, 気候が回復すると活発な光合成が行われ, シアノバクテリアの大繁殖が起こり大気中の酸素濃度が増加したのではないかと (J. L. カーシュビング)? 全球凍結の痕跡は 22 億年前のマンガン鉱床 (後述). シアノバクテリア大繁殖の痕跡は炭酸塩岩炭素同位体の正の異常 (生物が軽い炭素同位体を固定することにより大気中炭素同位対比が増加, 炭酸塩岩炭素同位対比は増加). しかしながら全球凍結の原因については不明.
- 大気中酸素濃度の増加による真核生物の出現 (21 億年前)
地球表層が酸化的になると, 酸素呼吸によって効率的にエネルギーを獲得できるようになり, 細胞の大きな原核生物が出現. それまで細胞質に浮かんでいた遺伝子は膜に包まれたまま核内に納められ, 真核生物が誕生. このような大型細胞に, のちにミトコンドリアとクロロプラストとなる細菌が入り込んで共生. 22 – 20 億年前に大気中酸素濃度が上昇した証拠あり. (縞状鉄鉱床と赤色砂岩 by P. クラウド, 堆積岩の化学組成 by H. D. ホランド) 一方, 21 億年前のグリパニア化石は真核生物の出現を示唆. 酸素濃度増加と真核生物出現を示唆する地質学的証拠の年代が近いことから, 両者の因果関係が主張される.
- 真核生物出現の謎
27 億年前の西オーストラリア泥岩堆積層にステラン (ステロールの分解生成物で, 真核生物の細胞膜に由来). 真核生物は 27 億年前に存在していた? シアノバクテリア付近の酸素濃度の高い領域で真核生物は局所的に生まれ, 繁殖した?

19 億年前

マントル対流が 2 層対流から全層対流へ遷移して火成活動が活発化し, 巨大な大陸が初めて形成された (丸山 1993).

5.2 原生代中期 (Mesoproterozoic): 16 億年前

19 億年前に形成された巨大大陸が離合集散. 北米大陸の基盤 (19 億年前), 大陸ネーナ (North Europe and North America, 14 億年前), ロディニア大陸 (12 億年前).

5.3 原生代後期 (Neoproterozoic): 11 億年前

10 – 5 億年前

原生代後期に形成された氷河堆積物は全球的 (赤道域まで) に分布. 氷河堆積物は縞状炭酸塩岩 (オーストラリア・グレートバリアリーフなどの熱帯浅水域に形成) に覆われる. かなり厳しい寒冷気候の後に気候が温暖化したことを物語る.

- 原生代後期, 全球凍結仮説 (J. L. カーシュピング)
先カンブリア代に訪れた氷河期に着目. 氷河堆積物が堆積した緯度を古地磁気学的に検討した結果, 氷床が赤道域付近まで発達していたことを示唆. 地球全体が凍結するほど氷河期の寒冷化が激しかったとする仮説 (1992 年). しかしながらこの仮説を支持するデータが断片的であったこと, 地球表面全域を氷床が覆うような氷河期は気候学的にあり得ないことから, 一つのアイデアに過ぎないとして見過ごされた.
- 全球凍結仮説のリバイバル (P. F. ホフマン)
地質調査研究における最後のフロンティアとして, また地球史解読の鍵を握る地域としてナミビアに注目. 砂漠を踏破し, 地層の対比を行い地質柱状図を作成. 化石に乏しい先カンブリア紀の地層の対比に, A. H. ノルらが確立しつつあった炭素同位体比を用いる方法を採用. ナミビア北部のオビタ地域に, 時代の異なる二つの氷河堆積物の存在を確認. 全球凍結仮説が信憑性の高い仮説にまで高められる.
- 原生代後期の全球凍結事件 (A. H. ノル)
グリーンランドやスピッツベルゲンなどの北欧で, 炭酸塩岩の炭素同位体比を地層の堆積した順番に従って測定. 炭酸塩岩の炭素同位体比は, それらが堆積したときの海水中の二酸化炭素の同位体比を反映していると考えられる. 異なる露頭で採集した資料の測定データを, 地層の積み重なり方を示した図にプロットし, 炭素同位体比の時間変動をグラフ化. その結果, 地理的に離れた地点の地層の炭素同位体比の変動パターンが良く対応 (炭素同位体比のグラフの比較で地層の同一時間面の対比が可能になる). 氷河期に対応して炭素同位対比が大きな負の値をとることが明らかになる. 原生代後期 (10 – 5 億年前) に氷河期は 5 回あった. (図 6).
- 全球凍結の原因 (G. ウィリアムス)
地軸の傾きが 60 度より大きかったために全球凍結が起こったという仮説. 高緯度域では夏季は日が沈むことなく太陽光を浴びるのに対し, 冬季は一日中日が昇ることがないため, 年間平均では極の方が赤道よりも暖くなる. このため地球が寒冷化へ向かうと赤道から氷床が発達し始める. しかしながら, 地軸の傾きが 60 度も傾いていた状態から現在の 23 度へ変化することは力学的に考えられない. このためにこの説は無視される. 気候の寒冷化は一般に大陸の成長と関係していると考えられている (大陸が露出して風化や侵食が進むと, 二酸化炭素分圧が下がり温室効果が弱まる) が, 全球凍結事件の原因はよくわかっていない. 顕生代に全球凍結が起こらなかった原因もよくわかっていない.
- 全球凍結が終った原因 (P. H. ホフマンの仮説)
南アフリカ・ナミビアのオビタ地域の炭素同位対比の測定. 氷河堆積物の上下の地層で炭素同位対比が負にシフトしており, 氷河堆積物の上に縞状炭酸塩岩が堆積していることを発見. 炭素同位対比の負へのシフトの原因は, 寒冷化したことにより生物圏が縮小し, 微生物の光合成がほとんど停止したためであると主張 (生命が無機物を材料に有機物を合成する場合には, 酵素反応によって選択的に質量数の小さい炭素 ^{12}C を利用. 生命活動が停止すると大気中に

質量数の小さい炭素が残り、同位体比は負ヘシフト)。また縞状炭酸塩岩の原因は、全球凍結後に気候の急激な温暖化が起こったためであると主張。全球的に氷河が発達すると大気と海洋との二酸化炭素のやりとりはなくなるので、火山活動でマントルからもたらされる二酸化炭素は大気に蓄積され続ける。二酸化炭素分圧が 0.12 気圧程度 (現在の 350 倍) になると氷床は解け始め、アルベドフィードバック (氷床が融けると地面が露出し、アルベドが下がることによって温暖化する) によって氷床はあっという間に消滅する。このとき地表の温度は 50 度を越えたかも知れない。温暖化によって水循環が活発になると地表の風化侵食が進み、大量のカルシウムが海洋に供給される。海洋中にも二酸化炭素は溶け込むので、大量に炭酸塩岩が堆積する。

6 億年前

～6 億年前から多細胞動物の化石が産出するようになる (カンブリア紀大爆発)。～6 億年前にも全球凍結の可能性があり (図 6)、全球凍結の後に多細胞動物が出現したようにも見える。氷河期はどのように多細胞動物の出現に影響を与えたか？

- 多細胞動物とは何か？

からだが多細胞動物からできており、より複雑な体制を持つ。細胞の機能分化が進む。細胞間の情報伝達に細胞接着分子 (コラーゲンやカドヘリン) を用いる。受精卵から出発して細胞分裂を繰り返し、幼生の段階を経て成体になる。遺伝子レベルで動物種の系統関係を調べると、多細胞動物の共通の祖先は立襟鞭毛虫。次に複雑なのが放射対称の刺胞動物 (クラゲの仲間)。残りの動物は左右相対称動物に分類され、からだに前後軸、背後軸を持つ。左右相対称動物には偏形動物、線形動物、環形動物、節足動物、軟体動物、脊椎動物などがある。

- 多細胞生物の系統樹

動物のからだづくりを担う遺伝子 (HOX 遺伝子) の分子生物学的な解明が進む。動物界で HOX 遺伝子がどのように分布しているかを調べることで、新たな多細胞動物の系統樹が描かれる。従来の形態や発生様式による分類とは全く異なる系統樹。多細胞生物の起源の全面的な見直し。多細胞動物の系統樹に年代を入れる試みも最近になって盛んになる。分子生物学的には最初の多細胞動物が 10 億年前に出現したとする見積もり。

- 化石に残された多細胞生物の歴史

6 億年前のカンブリア爆発に先立つ原生代末には、奇妙な形態の大型化石が多数産出。エディアカラ化石動物群は、6 億年前のバランガー氷河期の後に出現。正体不明の化石が多い。中国のリン鉱床からは細胞分裂段階の肺の化石。多細胞生物の発生がすでに 5.7 千万年前に進んでいた。化石記録と分子生物学的な多細胞生物の起源の時間的ギャップを縮める。～10 – 6 億年前にかけて、多細胞生物は段階的に新たな機能を獲得していったのだろう。

- 多細胞動物出現: 浅海域仮説 (マックメナミン)

ロディニア (ロシア語で「成長」) 大陸の名付け親であるマックメナミンは、ロディニア大陸の成長により形成された浅海域で多細胞生物が誕生したと主張。しかしながら浅海域の拡大事件はそれまでにも繰り返し起こったはず。なぜ原生代後期に多細胞生物が出現したのかは不明。

- 多細胞動物出現: 酸素増加仮説 (A. H. ノル)

大気中酸素分圧が高くなってオゾン層が形成されたことが多細胞生物の出現の原因である、とするバークナー・マーシャルモデル (1970 年代) のリバイバル。原生代後期の堆積岩炭素同位

対比の測定. 氷河期に堆積したものを除いて炭酸塩岩の炭素同位対比は大きな正の値をとる. 正のシフトは, 光合成活動が活発化し大気中の酸素分圧が上がった痕跡であると主張. 生物は光合成によって選択的に軽い炭素同位体を固定するため, 生物が炭素を固定して埋没すると, 残りの大気中の同位対比は正の値にシフトする. 原生代後期には生物の埋没量が上昇し, 有機物の分解に使われる酸素の量が減少することにより, 大気海洋中に残される酸素が増大する.

- 多細胞動物出現: 海洋安定成層 + 全球凍結仮説 (川上ら)

何らかの理由によって海洋が安定成層し, 深層水が酸素欠乏状態になると堆積物と一緒に有機物が埋没する. 一方で光合成によって大気中の二酸化炭素が消費されて, 二酸化炭素分圧は減少する. 二酸化炭素分圧の減少は温室効果を低下させ, 氷河期を招く. 氷河期になると表層海水の温度低下と塩分濃度増加によって, 表層海水の密度が大きくなり深層海水との混合が起こる. このとき栄養塩類, 鉄イオン, 二酸化炭素や硫化水素に富んだ海洋深層水が浅海域に流れ込む. このような海水から縞状鉄鉱床が堆積したり, 細かい縞模様を持つ異常な石灰岩が化学沈澱過程によって堆積. 縞状炭酸塩岩の堆積に伴って放出される二酸化炭素で気候の温暖化が起こる. しかしながら, 海洋が安定成層するメカニズムがない. また, 氷河期到来後の炭素同位対比の負へのシフトを説明できない. 旗色が悪い.

- 多細胞動物の出現と全球凍結の関連性 (カーシュピング)

全球凍結の後にシアノバクテリアの大繁殖があり, 酸素レベルが増大した可能性. 急激な環境の変化の際には遺伝子の組換え頻度が増大した可能性がある. 全球凍結後の地層に大規模なマンガン鉱床が形成. マンガンは還元海水中ではイオンとして溶け込んでいるが, 酸化になると酸化物として沈澱. 大規模なマンガン鉱床は, それ以前に大量に海水に蓄積されていたマンガンイオンが酸素レベルの増加によって酸化されて沈澱したことを示唆している.

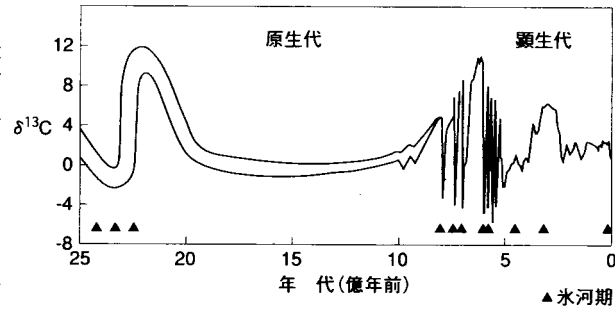


図 6: 原生代後期の炭素同位対比変動曲線と氷河期. 川上 2000, p 156.

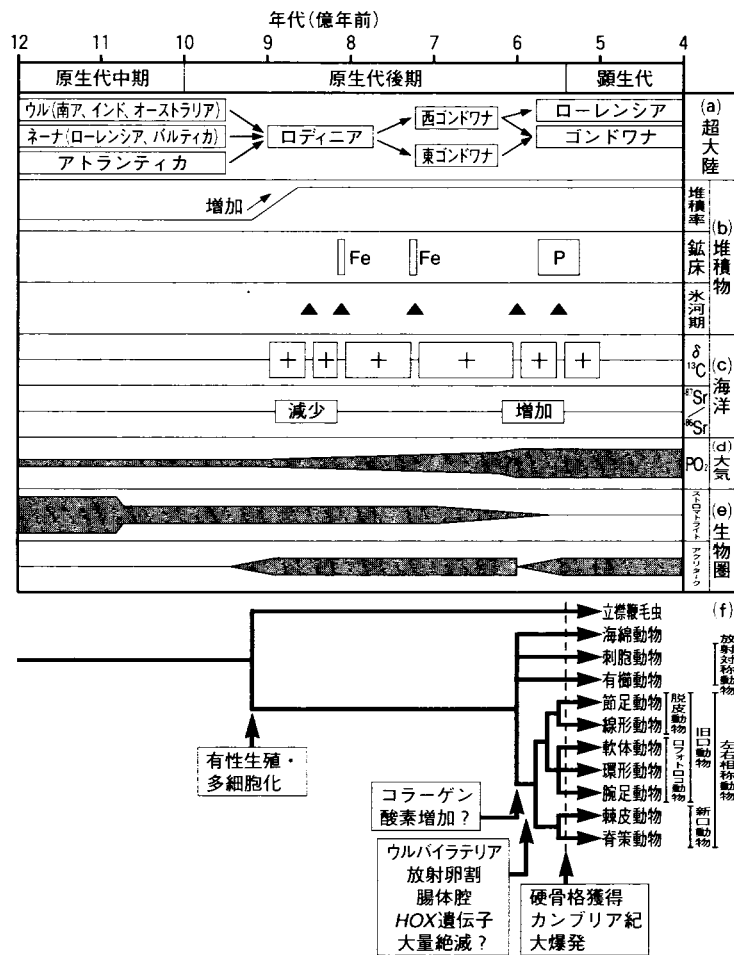


図 7: 原生代中期から顕生代初期の生命/地球史年表. 川上 2000, p 192.

6 顕生代 (Phanerozoic)

5.4 億年以降の顕生代では、多細胞動物が進化し、大量絶滅を繰り返す (図 8)。一方原生代後期に形成された巨大大陸は分裂と集合を繰り返す、それに連動して地球表層環境も氷河期と間氷期を繰り返す (図 9)。

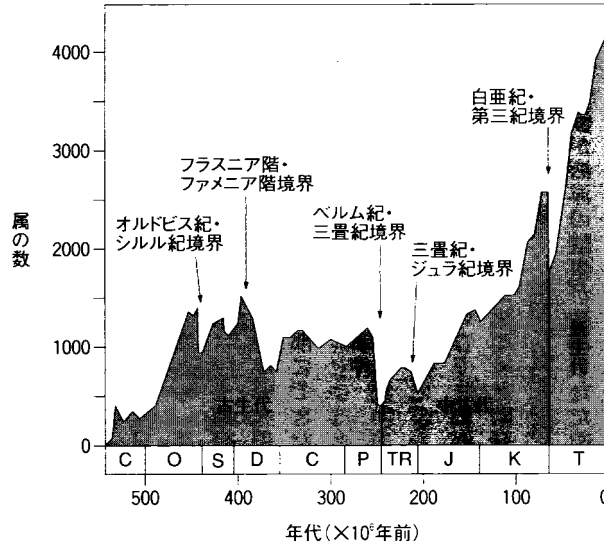


図 8: 顕生代の大量絶滅. 川上 2000, p 207.

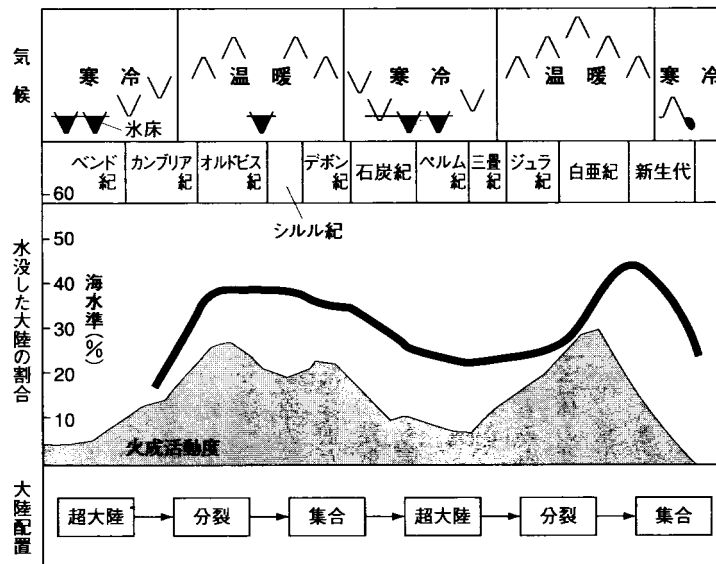


図 9: 顕生代の気候変動に見られる 3 億年周期. 川上 2000, p 152.

