

第7講 マントル対流の変化と全地球凍結：原生代

http://ext-web.edu.sgu.ac.jp/koide/chikyu/

Email: chikyu2019@ykoide.com

▼ 原生代はどんな時代か

1 期間

原生代：25 億年前～5 億 4200 万年前

2 原生代の特徴

地球の特徴がつくられてきた時代

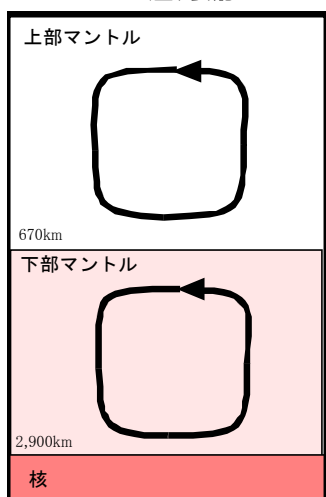
- ・大気の改変
- ・堆積岩の変化

▼ 28 億年前の事件：激しい火成活動

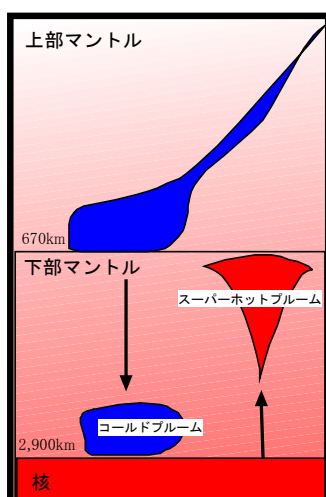
1 列島から大陸へ

2 2 層対流から 1 層対流へ

二層対流



一層対流



3 ウィルソンサイクルのスタート

大陸の分裂とリフト帯の形成

海洋底の拡大

沈みこみの開始

大陸の衝突

4 超大陸ヌーナの誕生：18 億年前

▼ 7 億 5000 万年の事件：海水の逆流

1 海水逆流のシナリオ

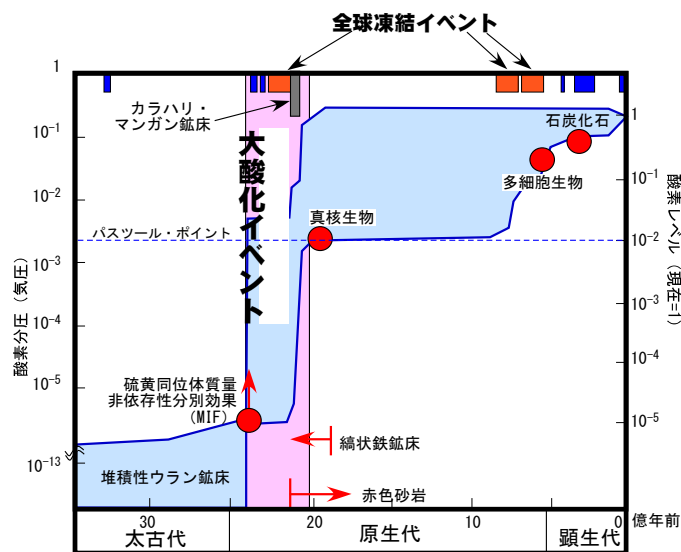
地球の冷却→含水鉱物のマントルに入るようになる

→海水の減少→陸地の増加

2 海洋の塩分濃度の変化

3 酸素の増加

4 火山活動の活発化



酸素濃度の推定と事件

▼ 全地球凍結：スノーボールアース

1 理論

2 観察

- ・氷河堆積物
- ・氷河地形
- ・乾燥した大陸

3 全地球凍結のようす：スノーボールアース

▼ 全地球凍結のシナリオ

1 全地球凍結へのきっかけ

- ・全地球凍結へのきっかけ

超大陸の分裂

二酸化炭素の減少

2 全地球凍結へ

暴走冷却

全地球凍結期：スノーボールアース

大陸の乾燥

3 全地球凍結からの脱出

二酸化炭素の濃集

温暖化

▼ 全地球凍結の問題点

1 生物はなぜ、絶滅を免れたのか？

2 全地球凍結は一度だけ？

- ・22 億年前の全地球凍結へのきっかけ

第7講 マントル対流の変化と全地球凍結：原生代

<http://ext-web.edu.sgu.ac.jp/koide/chikyuu/>

Email: chikyuu2019@ykoide.com

▼ 前口上：夢を実現するための方法7：自分のための選択

ポール・ホフマンの選択

1964年4月20日、身長182cmのポール・ホフマン、23歳は、ボストンマラソン出場した。目標2時間40分未満。ところが9位でゴール。記録は、2時間28分7秒。当時の世界記録から14分しか差がない。1964年9月の東京オリンピックにカナダのチームで出場が可能な記録であった。1968年のメキシコ・シティのオリンピックを目指す選択もあった。自分は1マイル5分39秒がベストだが、1マイル5分10秒なら金メダルの可能性がある。しかしそれは不可能で、オリンピックで金メダルをとる可能性がないと悟った。

▼ 原生代はどんな時代か

1 期間

太古代の終わりから、顕生代のはじまりの時期。

原生代のはじまり：太古代の終わり 25億年前

原生代の終わり：顕生代のはじまり 5億4200万年前

2 原生代の特徴

地球の特徴がつくられてきた時代

- ・大気の改変：太古代と原生代の境界の事件（前回説明）
- ・堆積岩の変化：大量の堆積岩の形成、生命の関係する堆積岩の形成
- ・大陸の成長における4つの大きな事件
- ・海水のマントルへの逆流 7.5億年前
- ・全地球凍結（スノーボールアース） 22億年前（1回）、7億5000万年前～5億8000万年前（2回）
- ・新しい生物の出現
多細胞生物の出現（10億年前）、硬骨格生物の出現（5.5億年前）

▼ 28億年前の事件：激しい火成活動

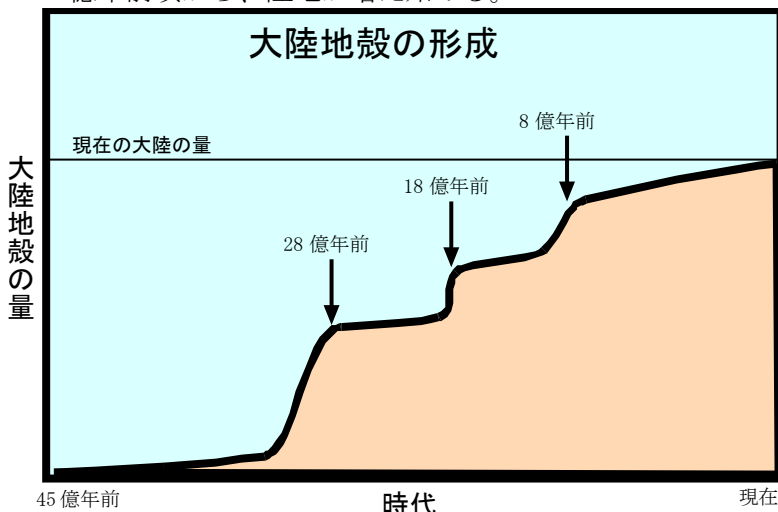
28億年前と18億年前頃に激しい火成活動が起こった。

このような激しい火成活動は、地球内の何らかの事件に対応しているはず。

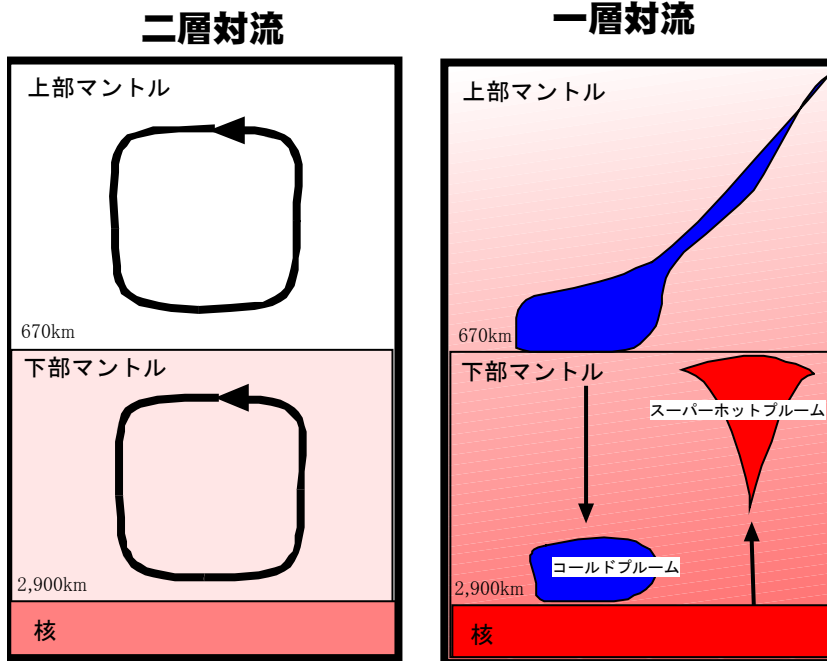
1 列島から大陸へ

太古代は、大きな大陸はなかったと考えられる。列島（島孤と呼ばれる）や、せいぜい小さな大陸程度（マダガスカル島程度）のものしかなかった。

28億年前頃から、陸地が増え始める。



2 2層対流から1層対流へ



28億年前に、マントル対流が、二層対流から、一層対流へ変わった事件が起こった。

一層対流とは、沈み込んだプレートは、670km（上部マントルと下部マントル境界部）にたまり、結晶がより密度の高いものに変化した後、重くなって沈む。

その反動として、核とマントルの境界部から、暖かいマントルが上昇してくる。

プレートの大きさは、対流の直径に匹敵すると考えられる。二層対流の頃は、700km くらいのプレートと大きくなり、一層対流になると、3000km くらいのサイズになる。このサイズのプレートで地球の表面を覆うと、10枚くらいのプレートの数になる。この数は、現在のプレートの数に一致する。

3 ウィルソンサイクルのスタート

ウィルソンサイクルとは、カナダの地質学者ツゾー・ウィルソンが提唱した、海洋プレートの一生涯をプレートテクトニクスで説明する考えである。

地球内部の熱の放出は物質の対流でおこなわれる。この対流の出口が海嶺である。海嶺では新しい地殻がつくられている。地殻とマントルの一部は、かたい板として地球の表面を移動する。このようなかたい板はリソスフェアとよばれる。地表は10数枚のプレートとよばれるリソスフェアに分けられている。プレートの水平運動によって、さまざまな大地の営みを考えることをプレートテクトニクスという。

大陸の分裂とリフト帯の形成

大陸が割れはじめ、割れ目にそった凹みができる。割れ目はリフトとよばれ、火山が発生する。アフリカの大地溝帯（リフト・バレー）がこの段階に相当する。

海洋底の拡大

リフトは割れつづけ、海水がはいり、ついに大陸地殻は分裂する。分裂した大陸地殻の間には海嶺が生まれ、新しい海洋地殻ができる。やがて広い海洋底として発展していく。紅海や大西洋がこの段階に相当する。

沈みこみの開始

広がった海洋底は、やがて大陸の下に沈みこみはじめす。大陸の縁には火山が生まれる。ところによっては、大陸から分離した島弧と縁海ができることがある。そして、海洋底が縮小していく。太平洋がこの段階に相当する。

大陸の衝突

海洋底はほとんどすべて沈みこみ、海洋の両側にあった大陸が衝突する。衝突のときには、大陸の間にあった多くの堆積物は沈みこむことができず、盛り上がり山脈となる。山脈の下では、変成作用や火成作用がおこる。この段階がヒマラヤ山脈に相当する。

4 超大陸ヌーナの誕生：18億年前

ローレンシアと呼ぶ人もいるが、ローレンシア大陸という名称は、後の時代のものにもあるので、ヌーナと

呼んだほうが区別しやすい。ヌーナとは、North Europe and North American の頭文字をとったもので、アメリカ、ハーバード大学のホフマン博士が命名した。

超大陸とは、地球の大陸の大部分（80 パーセント以上）が、一箇所に集まったものである。ヌーナは、現在の北米大陸の大きさに匹敵する。現在のその破片は、北米大陸、グリーンランド、スカンナビア半島、オーストラリア大陸、南極東部にある。

原生代後期には、造山運動が活発になる。造山帯と安定帯の区別がはっきりしてくる。

▼ 7 億 5000 万年の事件：海水の逆流

1

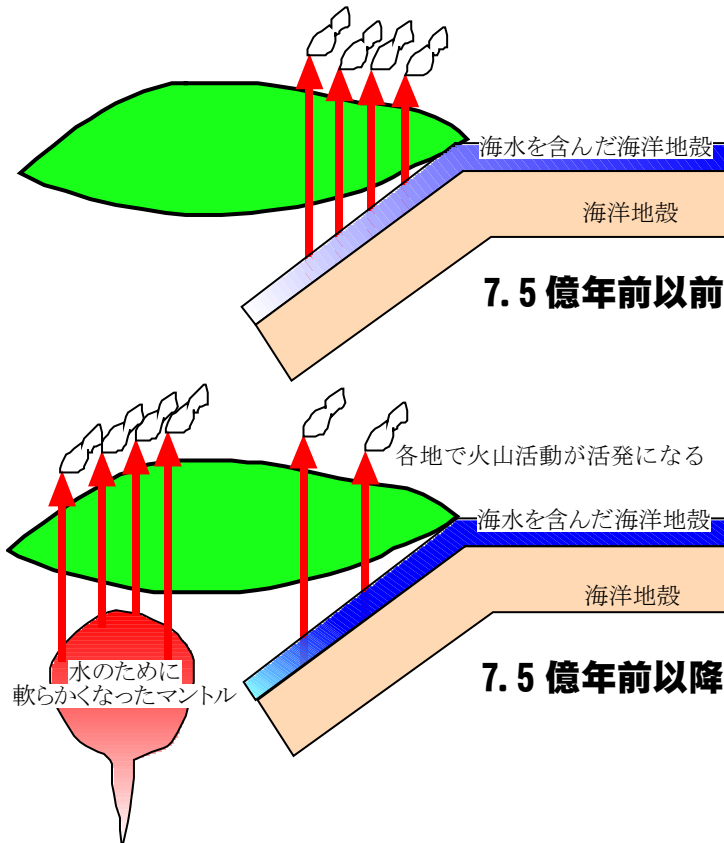
海水逆流のシナリオ

地球の冷却

地球は、内部に蓄えている熱を、マンテル対流として放出している。つまり、地球は少しずつ冷めている。

含水鉱物のマンテルに入るようになる

地球が冷めることによって、水が、マンテルに入るようになってきた。それまで、水を含む鉱物は、プレートがもぐりこむとき分解されていたが、7 億 5000 万年前ころから、水を含む鉱物がプレートと共にマンテルに入れるようになった。つまり、水が、マンテルに逆流をはじめた。



海水の減少

7 億 5000 万年前ころから、5 億 5000 万年前ころにかけて、海水は、徐々に減っていく。深さで 200~300m 分の海水が、マンテルに入った。

陸地の増加

そのために、陸地が広がる。それまで、陸地は地球の表面積の 10% くらいだったのが、現在の 30% くらいにまで広がった。また、水を含んだマンテルは膨れ、陸がより上昇する。

広い大陸ができ、砂漠や氷河もできる。大河の形成もおこり、堆積物も多く形成される。ただし、陸地が広がっても、岩石種が変わるわけではない。

2 海洋の塩分濃度の変化

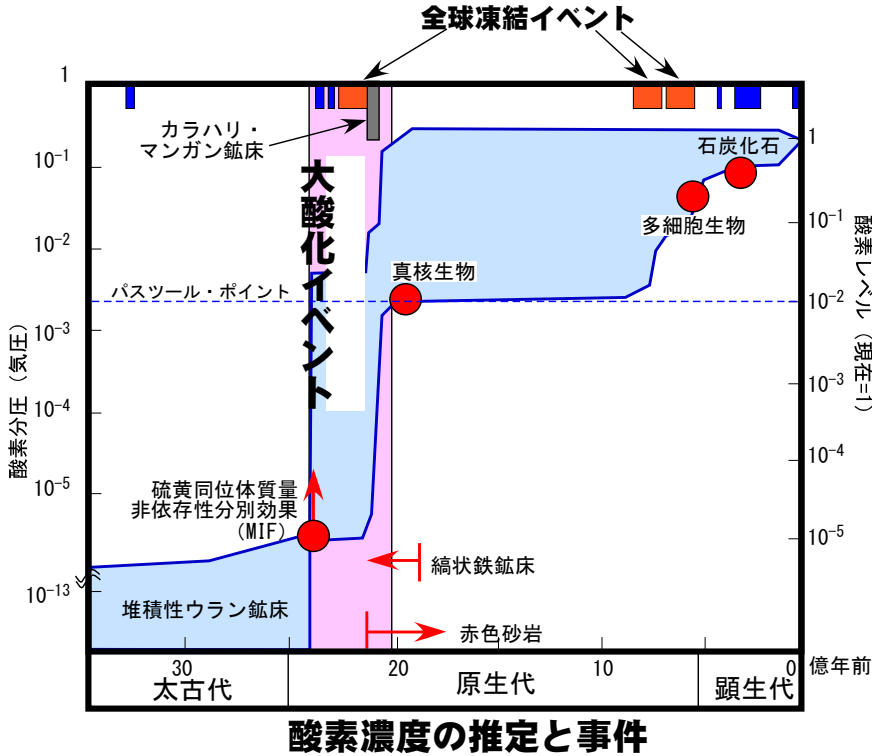
広がった陸地から、大量の陸の成分が溶け込み、海水の塩分濃度が上昇。

3 酸素の増加

増加した堆積物は、その中に含んでいたはずの有機物を分解しきれずに、岩石中に取り込まれた。炭素が、大気-海洋-生命のサイクルから除かれる。その結果、酸素が増加する。

4 火山活動の活発化

マントルに水が入ると、マントルは軟らかくなり、暖かいマントルが上昇しやすくなり、火山活動が活発になる。

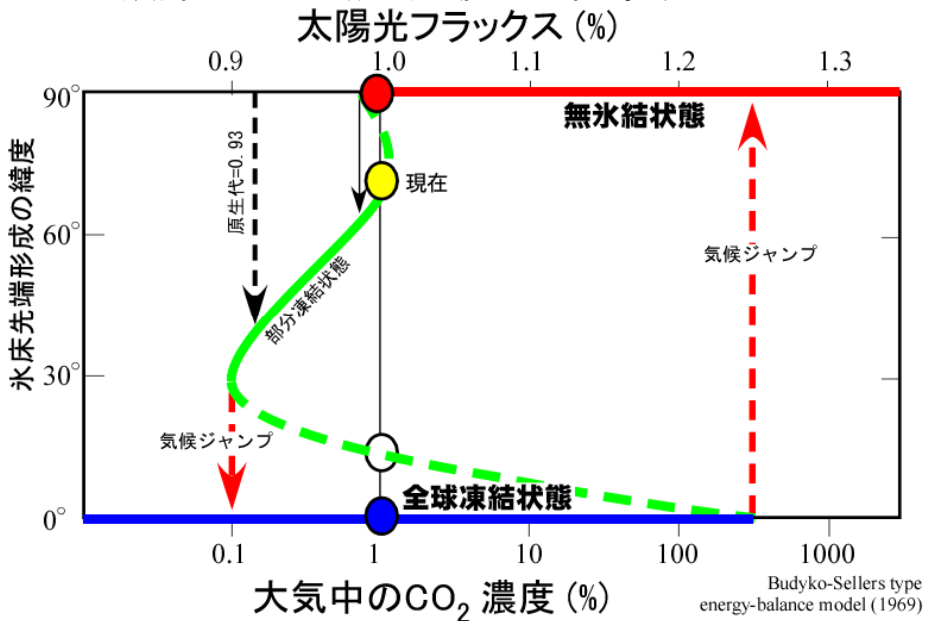


▼ 全地球凍結：スノーボールアース

1 理論

かつて気象学の理論から考えると、地球上のすべての H₂O が凍ることはありえないとされてきた。最近のシミュレーションでは、地球の気候には3つの安定した状態があることがわかってきた。

- ・無氷床状態：地表にまったく氷が存在しない状態
- ・部分氷床状態：一部分に氷が存在する状態
- ・全地球凍結状態：地球全体が氷で覆われる状態。平均気温-40℃



全地球凍結状態になっても、二酸化炭素が0.1気圧（今の数100倍）あれば、全地球凍結から脱出できることがわかっている。つまり、全地球凍結状態であっても、二酸化炭素を大気に蓄積するメカニズムがあれば、現在の地球に戻れることがわかっている。

その時間は1000年ほどの短時間でもどれる。さらに、もどっても大気には大量の二酸化炭素があるので、平均気温60℃ほどの高温状態へと移る。

2 観察

氷河堆積物や氷河地形などの氷河の証拠が見つかる。

・氷河堆積物

氷河堆積物とは、氷河によって運ばれた堆積物である。氷河によって形成される岩石には、**ティライト (tilite)**、**氷礫岩**：巨大な礫から粘土まで、さまざまなサイズの堆積物が混在した岩石
ヴァーブ (varve)：年輪のような縞模様をもつとよばれる堆積岩
ドロップストーン (dropstone)：氷河で運ばれた大きな石が、縞状堆積物の中に挟まっているもの

・氷河地形

氷河擦痕 (さっこん)：岩石につけられた氷河の傷跡

モレーン：氷河の通り道にできる傷跡

・乾燥した大陸

蒸発岩（石膏、岩塩）

このような岩石は、大陸地域が乾燥していたことを示す

氷河堆積物や氷河地形は、24億5000万～22億年前に1回（4回のうち最後の氷河期）、7億5000万年前から5億8000万年前までに2回の氷河期の地層が見つかる。

ヒューロニアン氷期：24億5000万～22億年前

スターチアン氷河期：7億6000万年～7億年前

マリノアン氷河期：6億年前

10億年前にできた超大陸ロディニアが、8億年前には、分裂はじめる。

氷河期の頃、大陸は赤道付近にあった。現在、赤道付近では、氷河は標高5000m以上でないと形成されない。5000m以上の陸地は、そんな広く分布することはない。

つまり、7～6億年前の地球全体が、非常に冷たかったことを意味する。

3 全地球凍結のようす：スノーボールアース

地球全体が真っ白で、雪や氷に覆われていたと考えられる。平均気温は-40℃、海面は1kmの厚さの氷に覆われていた。地球内部の熱が、放出されているので、海洋の底までは凍らなかった。こんな時期が、1000万年あるいはそれ以上続いた。

地球が白い雪球のように見えるので、スノーボールアースあるいは、全球凍結とも呼ばれている。

カリフォルニア工科大学クリシュヴィンク (Krischvink, 1992) が「スノーボール (Snowball Earth) 仮説」と名づけた。この仮説は、8～6億年前にみつかると縞状鉄鉱層を説明するために提示された。しかし、この説は忘れられていた。

1998年 ハーバード大学のポール・ホフマンは、炭素の同位体組成から、生物活動が停止したと考えた。

▼ 全地球凍結のシナリオ

1 全地球凍結へのきっかけ

・全球凍結へのきっかけ

ハーバード大学のポール・ホフマンの考え。

超大陸の分裂

7億7000万年前まで赤道付近にあった一つの巨大な超大陸ロディニアが、分裂をはじめる。6億年前には、大陸は小さく分裂し、赤道付近に分布する。

二酸化炭素の減少

赤道付近の大陸では、雨がたくさん降り、大陸を侵食する。激しい雨は、大気中の二酸化炭素を溶かし、大陸から持たされたイオンと結びついて、炭酸塩の沈殿物をつくる。

二酸化炭素の急速減少によって、温室効果が下がり、地表の温度が急激に下がる。

その結果、大きな氷が極地域の海にできる。広く白い氷は、太陽の光をたくさんはね返し、地球を暖めるために使われなくなる。

2 全地球凍結へ

暴走冷却

白っぽい地球は、寒冷化に拍車をかける。この連鎖が悪循環をうみ、全球凍結へと向かう。

暴走冷却によって、地球は一気に寒冷化が起こる。

全地球凍結期：スノーボールアース

地球は、一番寒い季節を迎える。全地球凍結期の平均気温は -50°C 、海面は1kmを越える厚さの氷に覆われていた

氷に覆われた海洋は、今まで海洋がおこなっていた役割を果たさなくなる。それまで、太陽光と地球の自転で、地球表層の温度を平均化する役割を果たしてきた。その働きを、海洋はしなくなったのです。

大陸の乾燥

海洋から、大気への水蒸気の供給はほとんどなくなる。つまり、雨が降らなくなる。大気は、乾燥していく。氷に覆われずにかろうじて残っていた陸地も、冷たく乾燥した砂漠となっていたはず。

3 全地球凍結からの脱出

二酸化炭素の濃集

二酸化炭素は、火山活動によって地球内部から定常的供給されていたはず。その二酸化炭素が、雨が降らないことで、大気中に二酸化炭素がたまってくる。氷の時代が1000万年以上も続き、火山活動が続くと、大気中の二酸化炭素の濃度は、1000倍になる。

大気への二酸化炭素の濃集によって、温室効果が促進され、暖かくなる。海の氷が融けて、やがて赤道付近では、氷がとけ、海が顔を出します。

温暖化

急激に熱くなることによって、大量の水蒸気が発生して、激しい温室効果が生じる。その結果、寒冷化のやり戻しのような激しい温暖化がおきる。その推定値は平均気温 50°C

▼ 全地球凍結の問題点

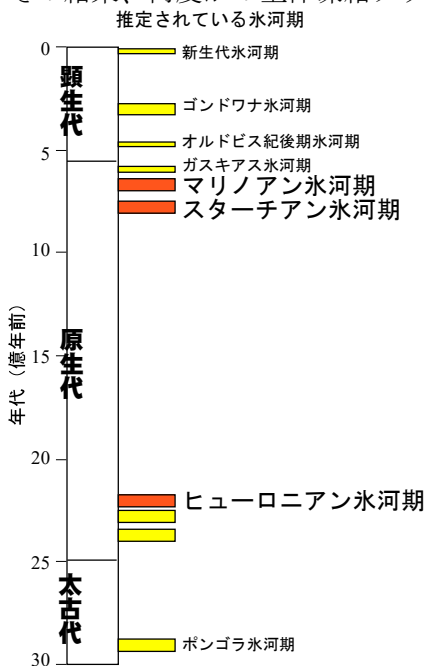
1 生物はなぜ、絶滅を免れたのか？

火山地帯で、生物の種を保存できた。

100個の火山があれば種の多様性は保存可能。

2 全地球凍結は一度だけ？

氷河の証拠とその分布や規模を調べることで、全球凍結の可能性を見つけることができる。その結果、何度かの全休凍結クラスの氷河期があったと予想されている。



・ 22億年前の全地球凍結へのきっかけ

カリフォルニア工科大学のジョセフ・カーシュビンの考え。

シアノバクテリアの出現。発生した酸素によって、大気中に合ったメタンが酸化されて、温室効果が弱まる。
そして、一気に全地球凍結まで至る。
カリフォルニア工科大学のジョセフ・カーシュビンの考え。