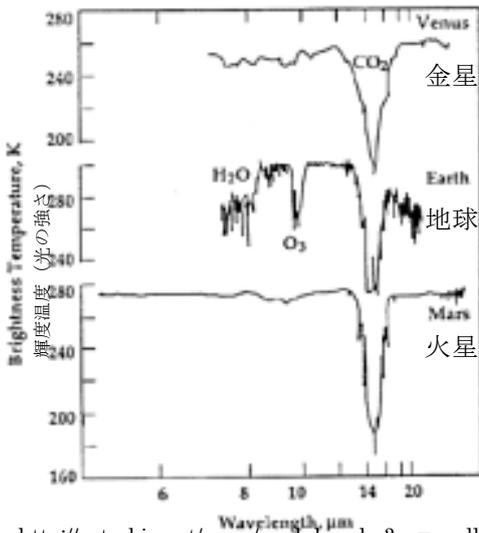


# 生命と地球環境の共進化—地球環境と人類の課題

埼玉大学大学院理工学研究科生命科学部門（理学部分子生物学科）教授 大西 純一 ohnishi@mail.saitama-u.ac.jp

## 1. 宇宙から見た地球



温室効果ガスの CO<sub>2</sub>は3惑星に共通だが、地球だけに水蒸気とオゾン O<sub>3</sub>が見られる（左図）。水蒸気が継続して存在することは、液体（または固体）の水の存在を示し、O<sub>3</sub>は酸素の存在を示している。（大気成分による赤外領域の吸収帯＝温室効果）

| 惑星                        | 金星       | 地球    | 火星       |
|---------------------------|----------|-------|----------|
| 太陽からの距離（億 km）             | 1.08     | 1.50  | 2.28     |
| 重さ（質量・10 <sup>21</sup> t） | 4.87     | 5.97  | 0.64     |
| 半径（km）                    | 6052     | 6378  | 3397     |
| 平均表面温度（℃）                 | 457      | 14    | -55      |
| 大気圧（hPa）                  | 93       | 1     | 0.007    |
| 主な大気成分                    | 二酸化炭素、窒素 | 窒素、酸素 | 二酸化炭素、窒素 |

■図② 金星・地球・火星の比較

<http://www.nineplanets.org/> より

<http://astrobio.net/news/modules.php?op=modload&name=News&file=article&sid=872> “You are here: Earth as seen from Mars”  
<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/spirit/20040311a.html>

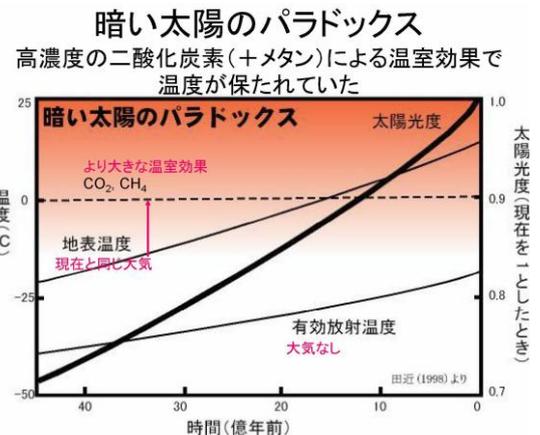
地球は太陽系唯一の、**酸素と液体の水**がふんだんにある惑星である。宇宙全体でもそれほど多くない、その理由：

- ① 適当な大きさの恒星（太陽）から適当な距離にあった。（大きすぎる恒星は寿命が短い、また、太陽サイズの恒星では、その放射熱が長期にわたってそれほど変化しない）
- ② さらに、適当な濃度の温室効果ガスが存在した。初期には CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, それ以降は主に CO<sub>2</sub>。（始生代＝太古代の太陽は、今の 70%程度と非常に暗かったが、それを補うほど多かった＝下図「暗い太陽のパラドックス」p. 3 で詳述）
- ③ 生命が発生し、さらに多量にある水を利用できる光合成生物が進化した。かれらは水を分解して酸素を大量に発生させた。（ストロマトライトの化石と縞状鉄鉱床がその証拠） pp. 4, 6, 7 参照！

## 2. 原油埋蔵量と消費量

原油埋蔵量：11,886 億バレル，生産（発掘）量：8024 万バレル/日。単純計算で 15,000 日＝40 年。現在の消費量は、1 バレル＝159 リットルで換算すると、80.24×10<sup>6</sup>×159 リットル＝12.8×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/日→4.7×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/年。白亜紀の最大（原油＝有機物）生産量の見積もりは、10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/百万年。人類は地球の最大生産速度の 500 万倍の速度で原油を消費し続けている！

その燃焼ガスの二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）が大気中に蓄積して温室効果ガスとして働き、温暖化がすでに始まっている。人間の産業活動は、地球環境システムに収まる範囲を超えている（松井氏著書など参照）。もし温暖化が起こらないとしても、化石燃料資源がこのまま 100 年も続かないのは明らか。石油の消費を抑え、**持続可能（sustainable）**なエネルギー源に移行することが急務。また、発生させた CO<sub>2</sub>は何とか固定（生物的・非生物的に）し、地殻内に戻したい。

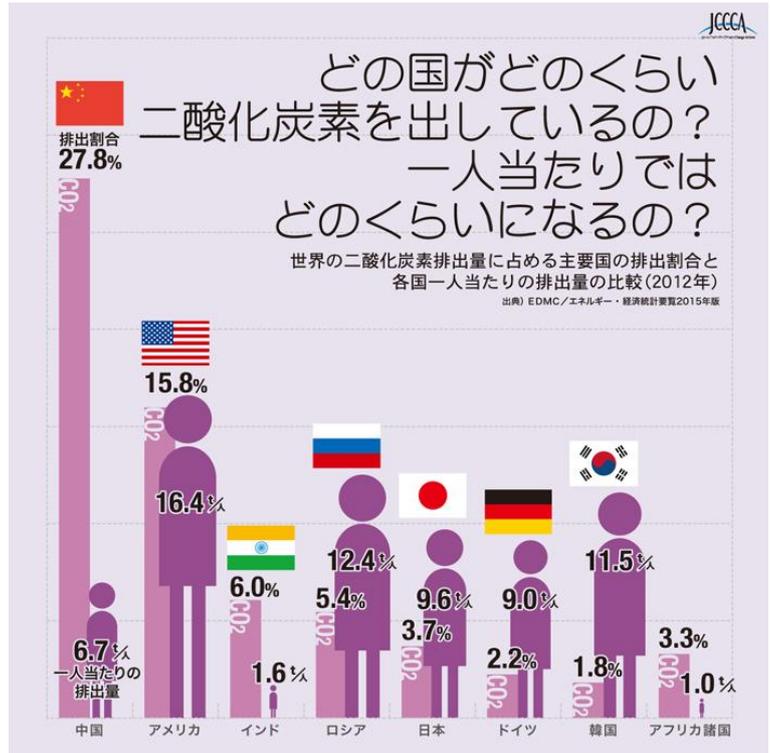


### 3. 生物としての人間のCO<sub>2</sub>排出と人間社会の排出

標準的な成人は 2,000 kcal/day×365 days = 7.3×10<sup>5</sup> kcal/年を消費する. 炭水化物(分子量 180, 6C=72) 1 g から 4 kcal の熱量が発生するとして, 1年に 7.3×10<sup>5</sup> kcal ÷ 4 kcal/g ≒ 1.8×10<sup>5</sup> g = 0.18 t 炭水化物を消費することになる. この量は, 炭素換算: 0.18 t × 72/180 = 0.07 t, CO<sub>2</sub>換算: 0.07 t × 44/12 = 0.27 t である. つまり動物として生きるのに約 1/4 t/人・年の CO<sub>2</sub>を排出する.

これに対し, 最貧国のアフリカでも化石燃料燃焼等による排出量は 1 t/人・年. 地球の排出量の 15.8%のアメリカでは何と 16.4 t/人・年. 排出量が急増しアメリカを

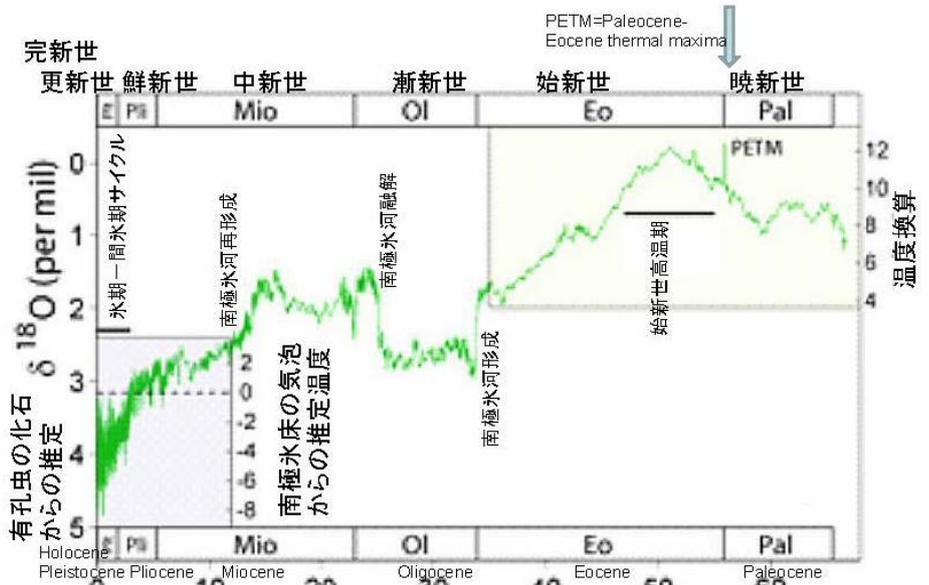
追いついた中国は 27.8%だが, 一人あたりはまだ 6.7 (これが今後更に増えるはず). インドも現在着実に増加中である. [アフリカ諸国中では, ナイジェリア・ニジェールが人口増]人間の衣・住, 社会・インフラストラクチャーを作る生き方自体が CO<sub>2</sub>排出の原因である!



### 4. エネルギー源としてのメタン

原油がなくなってしまうても, エネルギー源としてはメタン (CH<sub>4</sub>) があるかもしれない. 主に, 寒冷地や高圧の海底・地殻内でメタンハイドレート (水和物) として存在している. その埋蔵量は原油を上回るらしい. しかし, メタンをうかつに放出させると, その温室効果は CO<sub>2</sub> よりも強いので気候に与える影響は甚大. 実際, 新生代初期 5 千 5 百万年前の温暖化 (Paleocene-Eocene thermal maxima: PETM, 右図右上↓)は, 北大西洋の地殻変動によるメタンガス放出によるらしい.

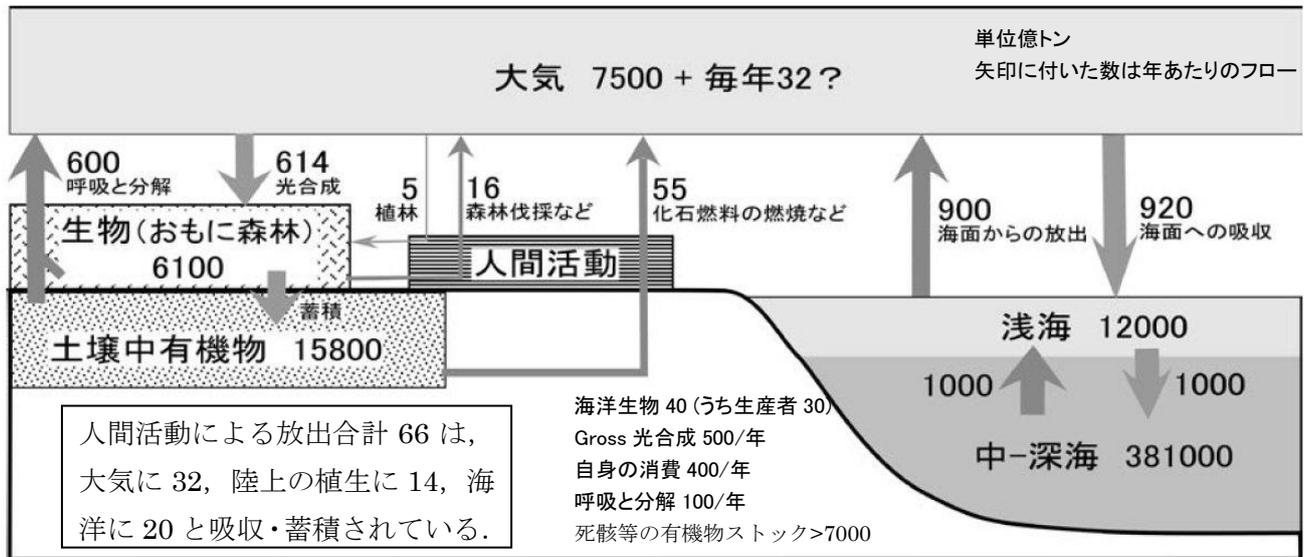
### 深海有孔虫の化石δ<sup>18</sup>Oから推定された新生代の気温の変遷



<http://essayweb.net/geology/quicknotes/iceage.shtml>

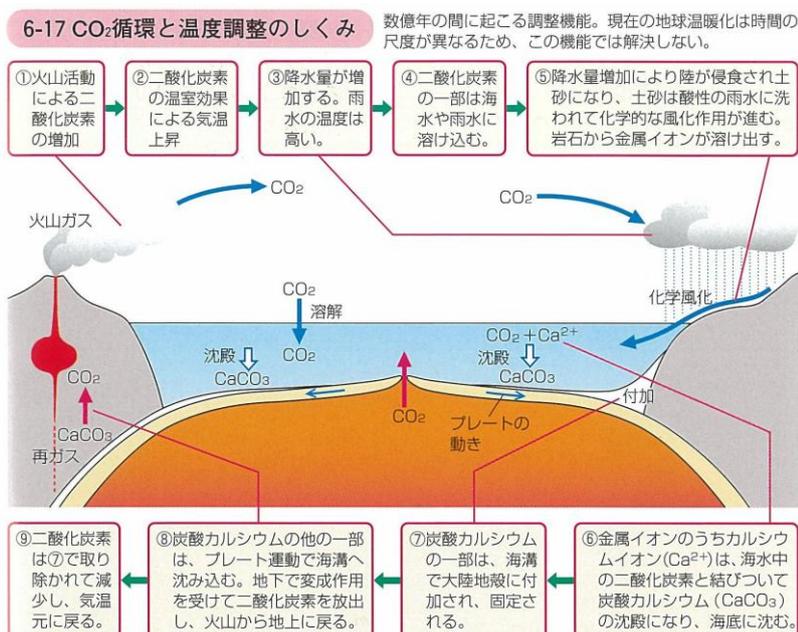
[http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:65\\_Myr\\_Climate\\_Change\\_Rev\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:65_Myr_Climate_Change_Rev_png)

## 5. 炭素の循環と温室効果



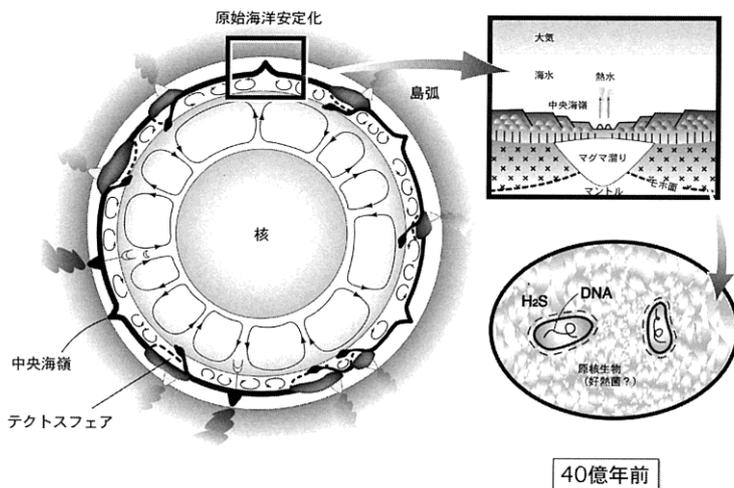
上図に、現在の地球上の炭素の循環をまとめた。人類の活動による温室効果ガスの蓄積で、温暖化が現実のものになっている（温室効果とは、地球が放出するはずの熱[赤外線]を大気中の温室効果ガス[CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, 代替フロン, 水蒸気]が吸収してしまい、一部を地球に戻すことで地球の温度が上昇すること）。しかし、温室効果自体は、地球ができ、ある程度冷えて以来、地球の表面温度を生物が発生・生存するのに好適な狭い温度範囲を保つことに大きく寄与してきた。40億年前には、太陽は現在の70%ほどの熱量しか放出しておらず、その後漸増して現在のレベルになってきた。その当時の大気組成が現在と同じであったとしたら、地球は凍り付いてしまっていただろう。太古代は特に二酸化炭素が多かったのでその温室効果で凍結が防がれていた。つまり、温室効果は地球生命にとって必須であったし、これからも必要であり続ける。（p. 1：暗い太陽のパラドックス）

下図は、二酸化炭素の循環（岩石の風化、炭酸塩の海洋底への沈殿、プレートテクトニクスによる炭素の地球内部への隔離、そして火山・地殻活動による地球内部からの放出）が、地質学的時間スケールで地球温度を一定に保つ仕組みを表している。



「徹底図解 地球のしくみ」新星出版社

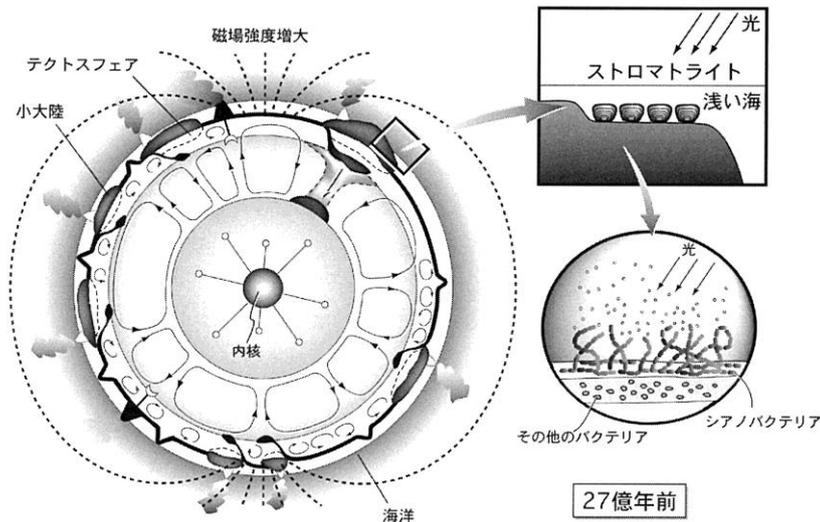
## 6. 生命と地球の共進化



40億年前

図 1.2.8 40 億年前の地球。プレートテクトニクスが始まり、大陸地殻の大規模な形成が始まった。原始海洋も安定化している。中央海嶺で激しく循環する熱水の流れの中で生命が誕生した。

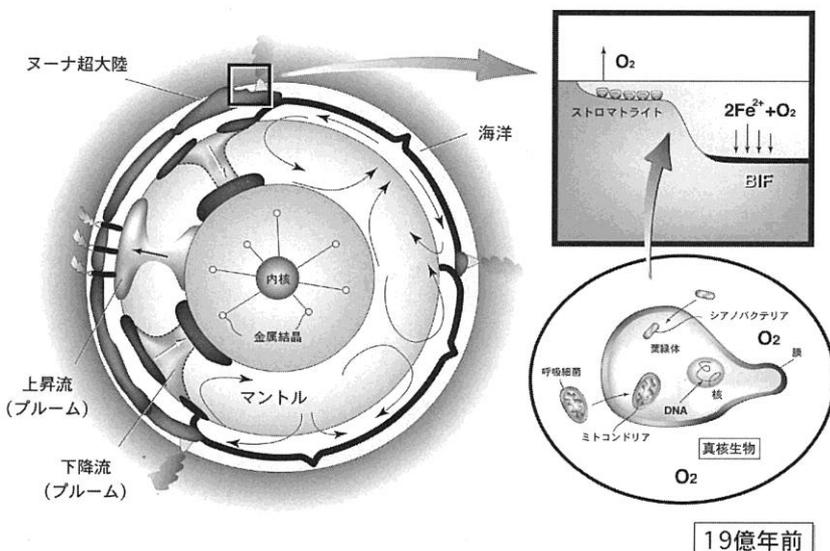
生命は、海底の熱水噴出口付近で発生したと考えられている。タンパク質、DNA、RNA からなる細胞がどのように発生したか、その仕組みはよく分かっていない。38 億年前の岩石（グリーンランド）に、当時の炭酸塩と比べ、<sup>13</sup>C の少ない炭素が含まれている。これが最も古い生物由来の炭素か？（以下 3 つの図は「全地球史解説」より）



27億年前

図 1.2.9 全マントル対流が始まり、磁場強度が増大した。磁場に守られて、生命は浅海に進出し、光合成を開始し、酸素による表層環境の汚染が始まった。

生命が浅海に進出し、シアノバクテリアによる**光合成**が大規模に始まった。酸素を消費する 2 価鉄イオンなどが大量にあったので、酸素が蓄積を始めるまでにはもう少し時間を要する。（縞状鉄鉱石 BIF: Banded iron formation の形成とストロマトライト）酸素は DNA を傷つけるなど、猛毒であり、生物は酸素の毒性から守る機構を発達させた。それに失敗した生物は、酸素のない環境へ逃げ込んだ。



19億年前

図 1.2.10 超大陸スーパーナが誕生し、プレートのサイズが 3000 km 程度にまで大きくなった。このころまでに細胞内共生によって真核生物が誕生した。

酸素濃度が第一段階の増加を始めた頃、古細菌の仲間の一部が、細菌を細胞内共生させてミトコンドリアに変えることに成功した。これらは、酸素呼吸によってエネルギーを効果的に ATP に変換できるようになり、ここに**真核生物**が発生した。さらにこの中から、シアノバクテリアを共生させ葉緑体とした生物（植物の系統）が生じた。（次ページ左図）

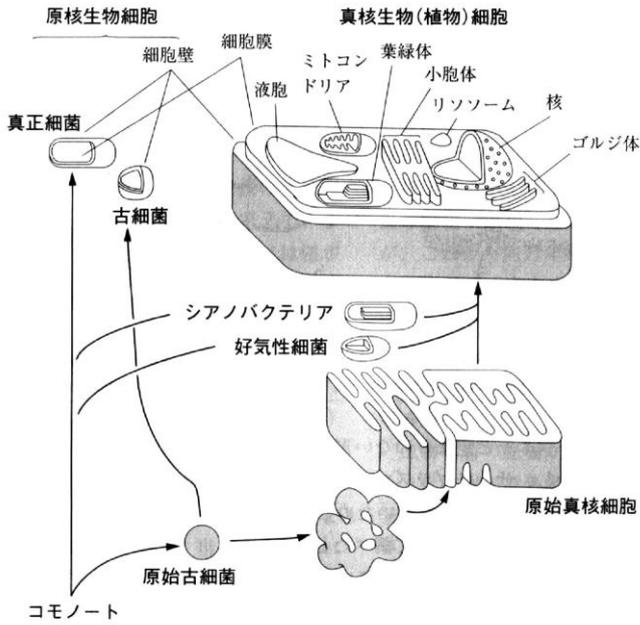
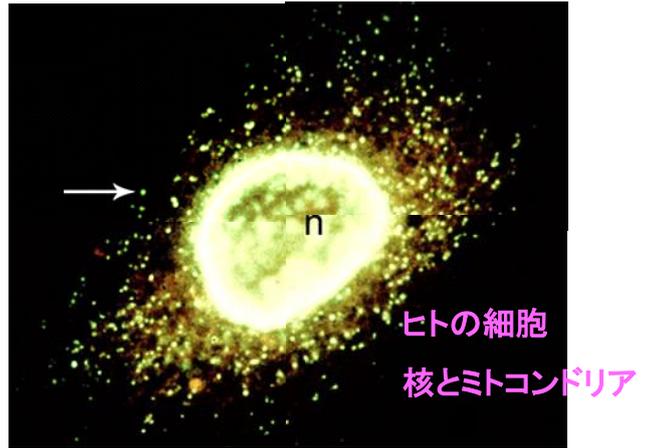


図13 真核生物細胞の進化 (山崎明彦, 『裸の細菌サーモプラズマ』, 科学 (岩波書店), 66 (7) 464-466, 1996.より改変)



細胞内の DNA を蛍光染色した図. 核(n)とミトコンドリア・葉緑体は別々の生物に由来する. だから, 動物は, 2 種の生物のキメラ(chimera)であり, 植物は 3 種 (以上) の生物のキメラである.

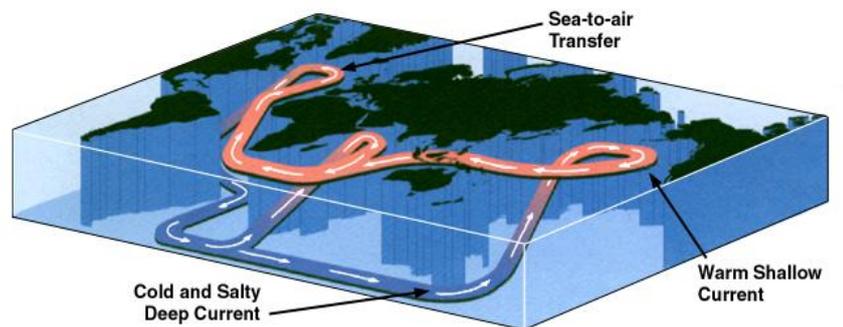
## 7. その後の生物の進化

エディアカラ生物群 (先カンブリア紀: 下左). 古生代, カンブリア紀の生物爆発 (下右).



## 8. 将来予測

現在の温暖化の結果どうなるかは誰にも分からない. 1 万 1 千年ほど前の氷河期終わりの温暖化当初 (Younger Dryas episode) に起こったように, 北大西洋に北アメリカの氷河が溶けた真水 (塩水に比べ軽い) が流入して, 海洋大循環 (メキシコ湾流が冷えて重くなり沈降, 南氷洋・太平洋を回って 2000 年ほどで循環する: 右図) を妨げ, 逆に寒冷化するかもしれない. (映画 The Day After Tomorrow)



酸素・鉄鉱石・石油は光合成生物から人類への贈り物！

## 9. 人類の課題-地球環境の歴史を顧みて将来を考える

### 希少資源：

化石燃料・リン酸鉱物（＝肥料）・石灰岩（Ca，地上で利用しやすいもの。海底には沢山あるが）

レアメタル・真水・漁業資源

失われつつあるもの・足りないもの：

さまざまな環境とその生態系・食料

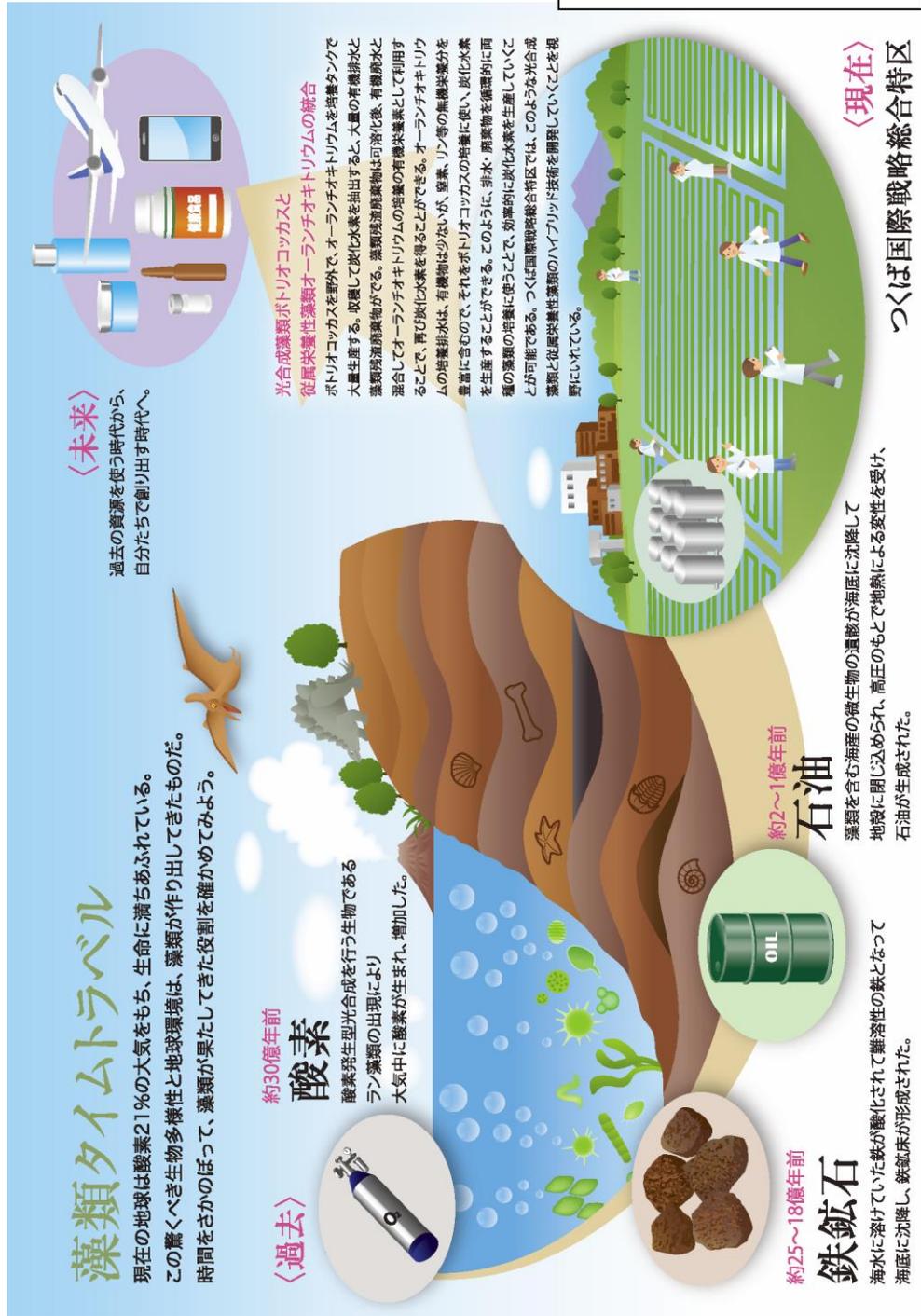
### その他人為的影響：

水質汚染（主に窒素肥料に由来する硝酸・亜硝酸）・温暖化（CO<sub>2</sub>・メタンガス）海面上昇（極地の氷床が溶ける）

海洋の酸性化→サンゴの減少・堆積岩の変化＝石灰岩減少

対策：太陽光・自然エネルギー・光合成産物（バイオマス Biomass）＝再生可能資源 Renewable resources を利用できる限り使い尽くして（現代の世代が、将来の世代の利益や要求を充足する能力を損なわない範囲内で行動する），sustainable society=持続可能な社会を実現させなければならない！

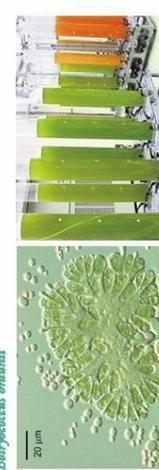
当面は、バイオエタノール・バイオディーゼル（下図）！？



### 藻類バイオマスエネルギーの実用化

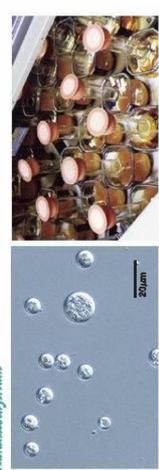
炭化水素生産藻類の屋外大量培養技術の確立に向け、つくば市内の耕作放棄地を活用した実証実験を行う。生産した藻類オイルはバイオ燃料やバイオプラスチックとして無限の使用可能性を留めている。

### ポトリオコッカス



- 淡水に生息する藻類
- 緑～赤色で30-500 μmのコロニーを形成
- 二酸化炭素を固定
- 産生する炭化水素は完全な石油代替資源
- 細胞内及びコロニー内部に炭化水素を蓄積（乾燥量の20-75%）

### オーランチオキトリウム



- 汽水～海水に生育する藻類
- 酸藻と有機物を利用して、炭化水素スクアレンを生産
- 細胞内に炭化水素を蓄積（乾燥量の20-30%）
- 炭化水素スクアレンは完全な石油代替資源として燃料のみならず、化粧品、医薬品、健康サプリメントとして利用可能

### 藻類に注目する理由

- ① 単位時間・単位面積あたりの生産性が高い
- ② 耕作可能地が多様
- ③ 食料生産と重複しない

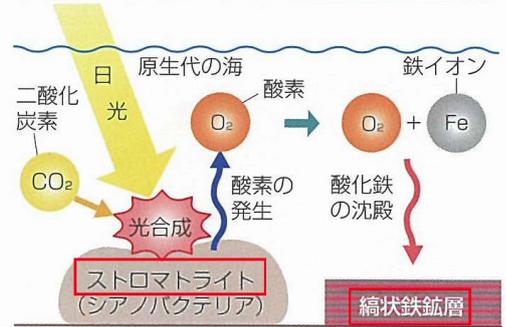
<http://www.tsukuba-sogotokku.jp/>

追加説明図



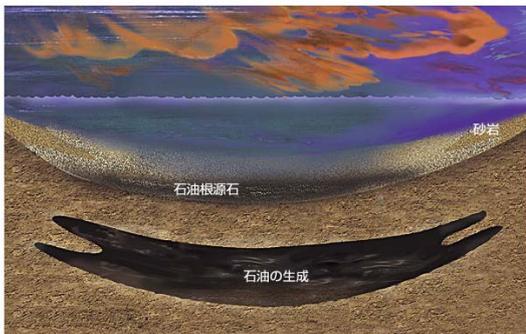
図1-1-3 酸素濃度の増大史  
現在の酸素レベルを1としたときの40億年前から現在までの酸素濃度の変化。「？」の部分は詳細が不明。  
酸素は生命が作った！！

2-11 酸素の発生と縞状鉄鉱層形成

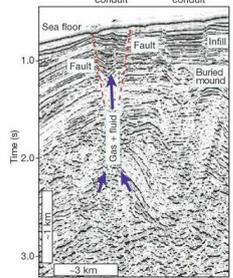


「徹底図解 地球のしくみ」新星出版社

海洋のプランクトンが石油に  
白亜紀当時の石油生成速度:最大で1000トン/年

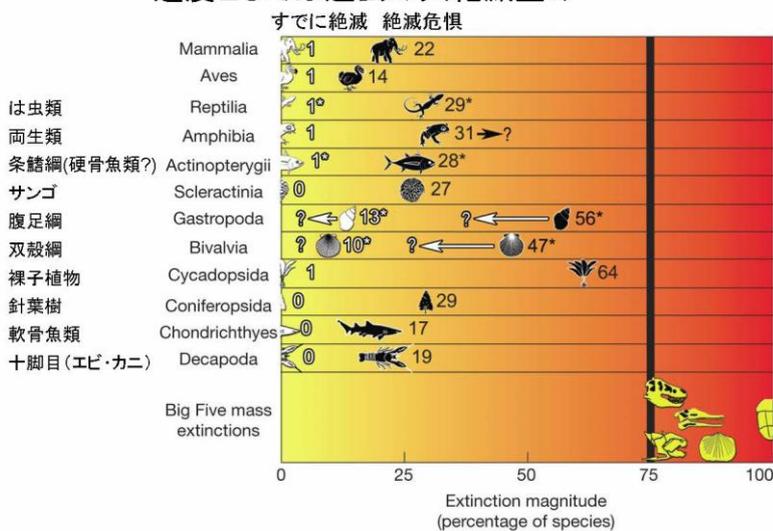


5500万年前始新世初期の温暖化は  
メタンガスの放出によるノルウェー沖

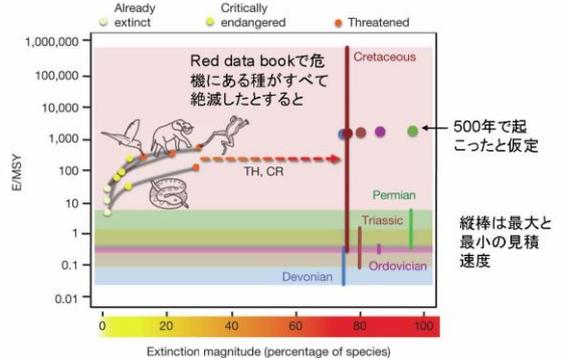


人類は第六回目の大量大絶滅を引き起こしている！Holocene 完新世を Anthropocene 人新世に

現状では、種の絶滅率は過去の大絶滅に及ばないが  
速度としては過去の大絶滅並み



500年間で起こったとして速度を比較すると  
他と引けを取らない



## 地質年代表

| 時代区分  |  |  | 地球環境と生物  |
|---|--|--|--|
| 代 Era   | 紀 Period (Epoch)   | 開始年代 (百万年)   |  |
| 新生代 Cenozoic                                      | 第四紀 Quaternary<br>Holocene 完新世<br>Pleistocene 更新世              | 0.0117<br>2.59   | 最近の間氷期 (完新世 Holocene→Anthropocene)<br>現生人類の出アフリカ(6 万年前までに)<br>氷河期・現生人類(15 万年前) |
|   | 新第三紀 Neogene<br>Pliocene 鮮新世<br>Miocene 中新世                    | 5.33<br>23   | アルプス造山運動<br>寒冷化  |
|   | 古第三紀 Paleogene<br>Oligocene 漸新世<br>Eocene 始新世<br>Paleocene 暁新世 | 33.9<br>55.8<br>65.5   | ほ乳類の発達・放散<br>始新世初期高温期 PETM (少なくとも 10 万年続いたメタンの放出による?)                          |
| 中生代 Mesozoic                                      | 白亜紀 Cretaceous   | 146  | 鳥類・被子植物・恐竜の繁栄と絶滅   |
|   | ジュラ紀 Jurassic  | 200  | 高温期, 恐竜全盛(白亜紀まで)   |
|   | 三畳紀 Triassic   | 251  | 裸子植物 パンゲア超大陸(~150)   |
| 古生代 Paleozoic<br><br>これ以降を総称して顕性代(Phanerozoic)と呼ぶ | 二畳紀 Permian  | 299  | 最大規模の大量絶滅(海洋酸素欠乏事変)<br>両生類・は虫類の発達  |
|   | 石炭紀<br>Carboniferous   | 359  | 寒冷期, シダ・トクサ類の大森林, 昆虫類の繁栄, は虫類  |
|   | デボン紀 Devonian  | 416  | 昆虫類・両生類  |
|   | シルル紀 Silurian  | 444  | 動植物の上陸   |
|   | オルドビス紀<br>Ordovician   | 488  | 魚類   |
| 原生代 Proterozoic                                   | カンブリア紀<br>Cambrian   | 542  | 海棲動物群の大爆発(530-520)<br>ゴンドワナ超大陸(520-180)  |
|   | 新原生代<br>Ediacaran エディアカラ紀                                      | 635  | エディアカラ動物群(570~560)   |
|   | Cryogenian   | 850  | 全地球凍結(Sturtian 750-700, Marinoan~635)  |
|   | Tonian<br>中生代  | 1,000<br>1,600   | 海水マントル注入開始<br>酸素のさらなる増加・陸地増加(ロディニア超大陸)<br>酸素呼吸開始, 真核生物, 藻類<br>スノー超大陸の形成(1,900) |
| 古原生代  | 2,600  | 全地球凍結(Makganyene マクガニョン 2,400-2,100 最も長く厳しい)<br>酸素発生型光合成(ラン藻), 大酸化イベント |  |
| 始生代 Archean                                       |  | 4,000  | 光合成開始・ポンゴラ氷期(~2,900)<br>全マントル対流, 外核の対流(地球磁場形成), 陸地の増大<br>生命の誕生(原核生物)           |
| 冥王代 Hadean  |  | 4,600  | 地球の誕生・海洋の形成  |

岩波「生命と地球の歴史」および、<http://www2.tba.t-com.ne.jp/nakada/takashi/strat-chart/strat-chart.html> による。

### 参考図書

「進化する地球惑星システム」東京大学出版会, 平ら「地球の内部で何が起きているのか?」光文社, 丸山・磯崎「生命と地球の歴史」岩波新書, 熊澤ら編「全地球史解説」東京大学出版会, 川上紳一「全地球凍結」集英社新書・「生命と地球の共進化」NHK ブックス, 田近英一「凍った地球 スノーボールアースと生命進化の物語」新潮社・「地球環境 46 億年の大変動史」化学同人・「大気の進化 46 億年」技術評論社, 園池公毅「光合成とはなにか」講談社, 林純一「ミトコンドリア・ミステリー—驚くべき細胞小器官の働き」講談社, 河野 重行「ミトコンドリアの謎」講談社, S.J.グールド「バージュス頁岩の物語」早川書房, S.コンウェイ・モリス「カンブリア紀の怪物たち」講談社, 岸野洋久「ゲノム進化の読解法」岩波科学ライブラリー116, 松井孝典「1 万年目の『人間圏』」ワック・「我関わる、ゆえに我あり—地球システム論と文明」集英社新書, NHK サイエンス・スペシャル「地球大進化~46 億年・人類への旅」日本放送出版協会, 宇佐見義之「カンブリア爆発の謎」技術評論社, 川上・東條「図解入門 最新地球史がよくわかる本[第 2 版]」秀和システム, 岸田一隆「3 つの循環と文明論の科学」エネルギーフォーラム(人類文明論), 本川達雄「生物多様性-「私」から考える進化・遺伝・生態系」中公新書