

第112回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

代表・世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail: jrfd117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail: chaino@cf6.so-net.ne.jp

■ホームページ■

<http://abductionri.jimdo.com/>

第112回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第111回アブダクション研究会のご報告をします。

■2016・12・17(土)に順延して開催しました、前回の第111回アブダクション研究会では、『気候学を学ぶ』という重要なテーマで、アブダクション研究会代表・世話人の福永征夫が教科書と参考書に基づいて、概略次のようなプログラムで、説明解説をさせていただきました。

1. 気候学とは
2. 世界の気候(大気大循環・世界の気温と降水)
3. 地球の気候はどう決まっているか(1. 気候システム<気候の成り立ち・気候を決める要素・地球の温度はどう決まっているか・温室効果> 2. 異常気象の発生<日本の異常気象・異常気象を起こすプレイヤー> 3. 気候変動の過去と現在<今は氷河時代のまっただなか>)
4. 21世紀の地球はどうなる(1. 21世紀の温暖化の進行・異常気象の変化 2. 異常気象の変化)

■気候学は、わたしたちの今後の日常生活にとって、大切な知識の分野であると同時に、アブダクション研究会にとっても、われわれが直面している地球規模の難題に対処するための欠くべからざる知見の分野です。

当日ご出席をいただきました伏見親子氏の熱心なご研鑽に敬意を表しお礼を申し上げます。

【1】地球の歴史という大時間・大空間のスケールで未来を見ると、地球の気候システムは、必ず起こる大陸の大地殻変動と火山の巨大噴火によって圧倒的な影響を受け、その位相がカタストロフィックに大変動するものだと言われています。

大陸は数億年のサイクルで集合と分散を繰り返しており、1年に数センチのスピードで今も進んでいるプレートの動きによって、2億～2億5000万年後には、現在の五大陸が超大陸「パンゲア・ウルティマ」に集結すると予想されていますし、今後も火山の巨大噴火

が必ず起きるものと考えられています。

【2】地球の気候システムとは、太陽活動によるエネルギーを駆動源とし、(1) 固体地球 (2) 気体地球 (大気) (3) 液体地球 (海洋) (4) 生物・生態系、の間の複雑・多岐にわたる動的な相互作用によって、さまざまな位相 (小時間・小空間、中時間・中空間、大時間・大空間) の部分域と全体域におけるエネルギーや熱の動的な均衡・平準化が図られながら決まる地球大気の総合的な状態の形成機構だと考えられます。

【3】群論では、自然に見られるシンメトリー (対称性) は、自然にもっともエネルギーの少なくてすむ配置を提供しているものだとされています。
わたくし (世話人) が提出しています「自然の循環の論理」のモデルでは、(1) 「引き込み合う」作用と「斥け合う」作用という二項は対称性の関係ですが、さらに複合的な対称性として、(2) 近くのもの「引き込み合い」遠くのもの「斥け合う」作用と、遠くのもの「引き込み合い」近くのもの「斥け合う」作用が示す対称性が考えられています。

【4】地球の歴史の中で見られる、主として大きな時間・空間のスケールにおける気候システムの大変動、特に【1】で述べたような位相がカタストロフィックに大変動するようなものは、上記の【3】に示す (2) の対称性を相転移の形で実現している大自然の時間と空間におけるグローバルな自己組織化のルールなのかも知れません。

■この案内状の最後部には、『気候学を学ぶ』と題する四部構成の取りまとめ資料を掲載しました。

1. 地球の歴史から気候システムの変遷を知る

：この部分は、鎌田浩毅著「地球の歴史」(上)(中)(下)(2016・中公新書)から抜粋引用し再録させていただきました。

2. 地球の気候はどう決まっているか

3. 地球の温暖化の進行を見る

：これらの部分は、鬼頭昭雄著「異常気象と地球温暖化」(2015・岩波新書)から抜粋引用し再録させていただきました。

ただし、2.の■大気の大循環■の部分は、日下博幸著「学んでみると気候学はおもしろい」(2013・ベレ出版)から抜粋引用し再録させていただきました。

4. 太陽活動が気候に影響するメカニズムを見る

：この部分は、多田隆治著「気候変動を理学する」(2013・みすず書房)から抜粋引用し再録させていただきました。

■重要性の高い気候学の知見をできるだけ広く、深く学んで、「持続可能性を確保する知識と行動」の探究につなげて行くために、部分的には見解を異にする複数の文献から密度の濃い取りまとめをするように心がけました。

世話人の意を体していただき、粘り強く繰り返しお読みいただき、これからのアブダクション研究会に生かしていただくようお願いをいたします。

■その他の参考文献：

「やさしい気候学第3版」仁科淳司著（2014・古今書院）

「気象学入門」古川武彦・大木勇人著（2011・講談社ブルーバックス）

■ところで、話題が変わりますが、わたくしは最近、著しい高齢化と少子化の中で、高齢者と若年者が抱える、ある面の課題について、身じかに痛感する機会を経験いたしました。

■2015年7月の中旬に、会員の皆様に配信しました世話人のエッセイを、下記に再録しますので、ご高覧ください。

環境が人間の能力を発展させたり、錆びつかせたりする

◇わたくしには、現在の高齢化と環境問題の趨勢がピークアウトするとされている、2050年に向かって進んでいるこの時期に、どうしても方向づけておかなければいけないコンセプトがあるように思われます。

◇それは、①人との会話を不得手にし好まない若年者が増えていることに歯止めをすることと、②高齢者の概念を熟達者の概念に転換して、人は生活習慣を刷新すればいつまでも伸び続けるのだという社会の通念と確信を築くことです。

◇ある都内の公共施設の会議室をお借りして、アブダクション研究会を開催したのですが、講演者の説明資料を投射するプロジェクターが機能しないという失敗をしました。

◇以前のNEC会館では専門の人にやってもらっていましたし、学会の発表でもスタッフがやってくれますので、わたくし自身がプロジェクターの扱いを知らなくてもよかったです。

◇新しい会場ではその条件がなくなっていたのです。ピンチに遭遇して、わたくしは現場で方法の限りをつくしたのですが、かなわなかったのです。

◇その翌日から、調査を始めました。

映らなかった機械A（品番を記録しておきました）、機械B（品番を記録しておきました）、ともにエプソン製でしたのでメーカーサイドに確かめました。

福永：プロジェクターのコネクターは、マイナスピ（メスピ）。

PCのコネクターもマイナスピ（メスピ）。

両方をつなぐには、プラスピ（オスピ）とプラスピ（オスピ）を両端にもつケーブルが必要なのですが、機械Aにも機械Bにもついていないのは、どういうわけなのでしょう。

会場の担当の方に重ねて聞いても、そのようなケーブルはありませんという返事だったのです。

メーカーサイド：機械Aには付属品としてついていたはずです。

機械Bではユーザーが用意する必要があります。

福永：機械Bには、PCのUSBから、プロジェクターのUSB端子に接続するコードがあったものですから、それに接続の機能があるものと推定して、いろいろやってみたのです。ところが、全く結果がでなかったのです。

メーカーサイド：機械BのUSB経路を利用するには、PC側にソフトのインストールが必要です。

◇われわれは、以上のようなボトルネックによって、失敗すべくして失敗したのだということが判明したのでした。

会場の施設側にも配慮の不足があったのですが、いまさら言っても、覆水は盆には返りません。

わたしに事前の知識なり取り扱いの経験さえあれば、近所の電気屋さんから、プラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつケーブルを緊急調達することもできたし、USB経路を利用することもできたのです。

◇ところで、都内にある、次のアブダクション研究会の会場を事前にチェックしたところ、プロジェクターの借用料がかなり高額なのです。

より低額品の借用の交渉をしましたが、自己防衛も必要と考えて、携帯用の自前のプロジェクターをネットで購入しました。

そして、くだんのプラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつ5mケーブルを手に入れるため、辺鄙な立地のA電気という量販店に雨の中をタクシーで往復しました。

◇この量販店のA電気に関連して、わたしが聞き出したことは、またもや驚きの経験でした。

スタッフの人は、物品の場所まで案内してくれるのですが、ほとんど会話の機会を与えようとしないかのような無口な接客様式なのです。

帰りのタクシーの運転者が物知りの人でしたので、聞きましたら、最近の若い人には、初めての人と丁寧な言葉でやりとりするのを好まない、もっと言えば、嫌がり、忌避する傾向が増えているので、

量販店のA電気は、それに合わせた接客様式をベースにしているようだという話をしてくれました。

◇わたしがネットで取得した携帯用プロジェクターを試して見たのですが、やはりパワーが不足していて、大きな会議室での利用には向かないことも、経験をして見て、やっと分かったことなのでした。

◇いかにして、熟達者が新しいことを経験しながら社会生活をするように、自分を仕向けていくことができるのか。

◇若年者が、他者とのコミュニケーションの習慣を充実させるように、いかにして、自分を仕向けていくことができるか。

◇必要は発明の母とはよく言ったもので、環境が人間の能力を固定化したり、発展もさせるのです。

わたくしには、2050年に向かって進んでいるこの時期に、熟達者と若年者の社会的な活性化策は、どうしても方向づけておかなければいけないことだと思われま

以 上

(2) アブダクション研究会は、次なる30周年に向けて、新たに有意義なスタートを切ってまいります。

今年は歩んできた道を踏みしめ、次なる30周年に向けて、新たなステージの夢と展望を描いて共有し、気持ちも新たに有意義なスタートを切ってまいりたいと存じています。

次なる30周年に向けた、新たなステージの夢と展望は、「どのような方向に広域学の確立をめざすのか」という点に求めて行きたいものと世話人は思案をしています。

すなわち、それは、次の二点に集約されます。

①「精神」のプロセス、「物質」のプロセス、および「生命」のプロセスを、共通的に認識し理解できるように、広域的な知識を発見し発明して高次の包括的な知識を創造する道への入り口をどのように切り拓くのかを探究し、発信できるようにすること。

②以上の探究と平行に、「持続可能性を確保する知識と行動」を探究し実践に移すことのできる条件を確保できるようにすること。

皆様はいかがお考えでしょうか。

わたくし宛にご意見とご感想をお寄せくださることを希望し期待しています。

(3) 次なる30周年に向けた、新たなステージのアブダクション研究会は、「過去を想起し、未来を想像し予期して、今ここに対処する」という、人間の認知、思考と行動、評価・感情のパターンに則って、テーマや活動の時間・空間の深さと拡がりを追求してまいります。

これは、世界や社会の歴史と未来への展望のはざままで、現前に対して、避けず、逃げず、ぶれずに、本質的で、現実的な、対処を行かなければならないという、アブダクション研究会がめざす、取り組みの基本的な姿勢と態度でもあります。

また、狭義には、過去とは、アブダクション研究会の今までの記録でもあり、未来とは、次回研究会から来年度までの予定と計画でもあります。

常に、そうした活動の時間・空間の深さと拡がりの幅・厚みと奥行きを意識し合い、認識し合い、確認し合いながら、現前の活動を連綿として引き継いで、躍動するように、活動を積み上げてまいります。

(4) 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形成的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期してまいりますので、各界、各分野、各層の皆様のご積極的なご参加をお願いします。

(5) アブダクション研究会は、現在、新規の会員を募集しています。

新規の会員として、年齢・性別を問わず、①環境の変化に対応して個人や集団の能力をどのように発展させるのか。②人・もの・生命の情報のネットワークはどのように組織化されるのか。③持続可能性を確保するための知識と行動とはどのようなものなのか。などのテーマの研鑽と探究に興味と関心を共有でき、隔月のアブダクション研究会に継続して出席できる方を募集しています。

皆様のご友人や知人、関係先の方で、われわれと志を共有できる方がおられましたら、世話人または事務局に積極的にご連絡くださいますようお願いいたします。

(6) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けてまいります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けてまいります。

(7) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的にお申し出下さい。

皆様には、今後、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的にお申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れをいたします。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

記

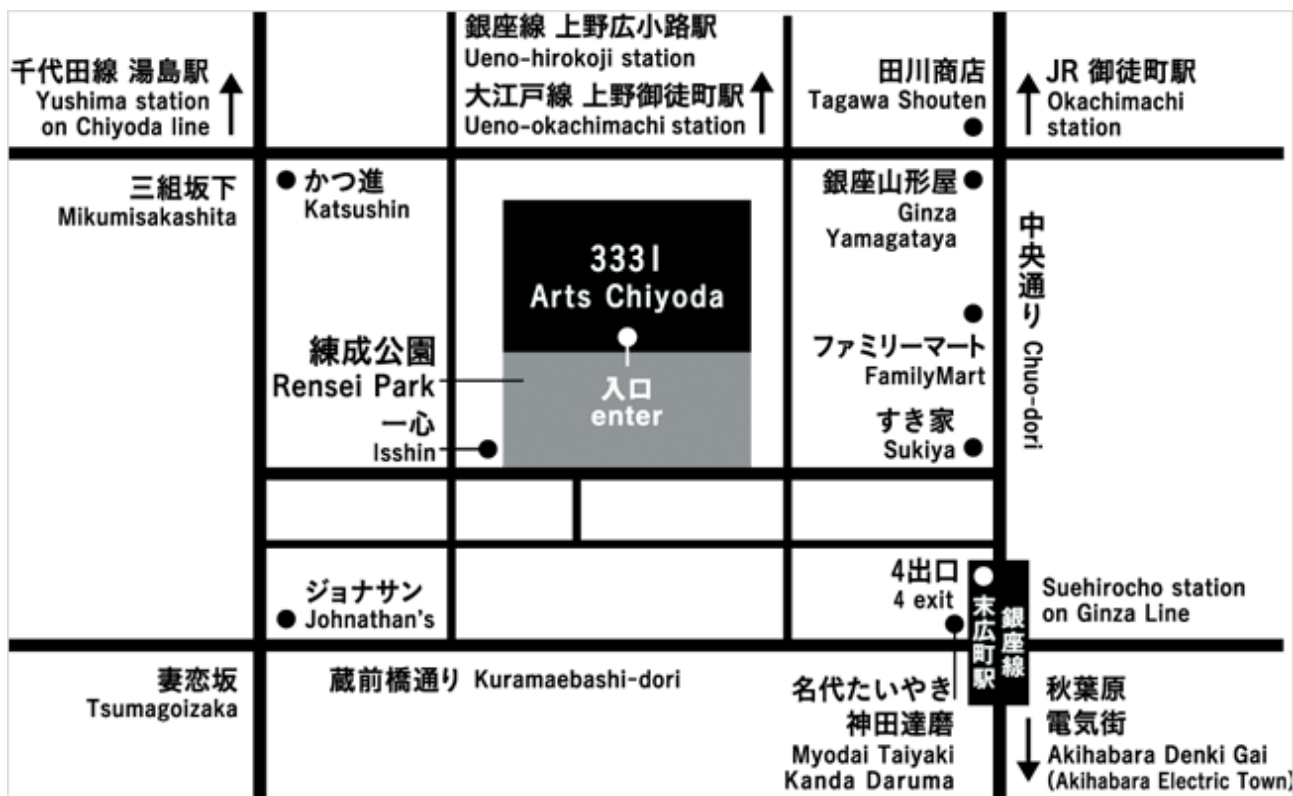
◇ 日時： 2017年1月28日(土) 13:00~17:00(本会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場 所： 3331 Arts Chiyoda 1階・101号室

〒101-0021 東京都千代田区外神田6丁目11-14（旧・練成中学校内）
TEL 03-6803-2441（代表）

東京メトロ・銀座線 末広町下車④出口 徒歩10分 練成公園隣の旧・練成中学校内です。

*当日の連絡先（福永征夫・携帯電話）080-3515-9184



◇ テーマ： 研究発表

『持続可能性を確保する 広域的で高次の知識と行動を考える（1）』

アブダクション研究会代表・世話人 福永 征夫

参考文献は、当日にご案内します。
ノートのみ持参で、気軽にご参加ください。

■■ 会員の皆様には、知人や友人もお誘いいただき、
積極的なコミットメントをお願いします■■

◇プログラム：

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| (1) 解説発表[PART-1] | <u>13:00~14:20</u> |
| <小休止> | <u>14:20~14:30</u> |
| (2) 解説発表[PART-2] | <u>14:30~15:50</u> |
| <小休止> | <u>15:50~16:00</u> |
| (3) 総合的な質疑応答： | <u>16:00~16:30</u> |
| (4) 諸連絡： | <u>16:30~17:00</u> |
| (5) 懇親会：<皆様の積極的なご参加を期待しています> | <u>17:15~19:15</u> |

【第 112 回 アブダクション研究会の出欠連絡について】

- 1/23 (月) までに、下欄の要領で、必ず、ご返信ください。
- なお、研究会会場では、飲み物のサービスがありませんので、皆様が各自で、ペット・ボトルや水筒をご持参ください。

第 112 回 アブダクション研究会 (1/28) の出欠連絡

- 1/23 (月) までに、**必ず、ご返信ください。**
- 研究会、懇親会とも、必ず、下記により、ご連絡ください。
新会場のため、研究会、懇親会とも、より綿密な準備が必要なことを、何卒、ご理解ください。

FA X : 042-356-3810
E-mail : chaino@cf6.so-net.ne.jp 岩下 幸功 行

- 出席 出席
●1/28(土)の研究会に、未定ですが調整します。●懇親会に、未定ですが調整します。
欠席 欠席

ご署名 _____

■次々回 2017年3月度の第113回アブダクション研究会は、
●2017年3月25日(土)、または3月18日(土)に、開催いたしますので、皆様には今からご予約いただき、積極的にご参加ください。
確定日程は、会場確保の目処がつき次第、直ちにご連絡します。

●テーマ : 『「光の場、電子の海----量子場理論への道」吉田伸夫著/2008新潮社/を輪読研究して「物質とは何か」を学ぶ』

●輪読研究の発表者 : 2017年1月に募集して決定する。
皆様には、積極的に申し出下さい。

■皆様、どうぞ、ご期待ください■

<定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。

皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで(第1回~第111回)の研究発表やなされた議論(「議事録」を参照下さい)に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。

46億年前の地球誕生以来、二酸化炭素の濃度は、複雑な物理過程を経ながら劇的に変化してきた。実は、炭素は安定した環境を保つための重要なメンバーなのだ。二酸化炭素をはじめとする炭素の貯蔵場所（リザーバーと呼ぶ）の移動が、地球を安定させてきたからである。炭素に関連して、地球が持つ優れた回復・調整メカニズムについても紹介する。

気候変動を制御する炭素循環

【3】地球の歴史は「気候変動」の歴史でもある。40億年前に始まった太古代（40億～25億年前）から現在まで、地球上では温暖化と寒冷化が繰り返されてきた。過去の堆積物をくわしく観察すると、地表全体の平均気温が大きく低下した「氷河時代」が何回も起きていたことがわかっている。たとえば、古生代の石炭紀末（およそ3億年前）にも大氷河時代があった。ちなみに、現在の地球は、南極やグリーンランドなどの極地に厚い氷床が存在するため、地球科学では氷河時代に区分されている。

【4】意外に思われるかもしれないが、実は、地球環境は安定を嫌うのである。もともと不安定であり、絶えず変動するのが本来の姿と言っても過言ではない。二酸化炭素の濃度も、地球規模の「炭素循環」によって絶えず変化してきた。実際には100万年という長期間に、炭素は複雑な経路をたどりながら、地球の表層と内部を大規模に移動してきた。

【5】こうした大循環について具体的に見てみよう。地球内部をタマゴにたとえると、タマゴの殻が一番表層にある「地殻」であり、その下にある「マントル」は多少の流動性を持つ白身のイメージである。そして地球の中心にある「核」(コア)が、タマゴの黄身にあたる。地球全体で見ると、炭素は地殻よりもマントルと核のなかに圧倒的に多く含まれる。つまり、炭素全量の5パーセント以下だけが、地殻に残されているのだ。また、炭素は地球の表層部では、海洋、生物、大気の順番に多く含まれており、おおよそ海洋（8割）、生物（2割弱）、大気（数パーセント）の存在割合となっている。まず、地殻の下にあるマントル内部に含まれる二酸化炭素が、海底にある中央海嶺の火山活動によって、海水中に放出される。さらに、海洋プレートが大陸プレートの下へ沈み込む地域では、地下のマグマが大陸を貫いて地上に噴出する際に、大量の二酸化炭素が大気中に出る。これは、マグマ中に数パーセントほど含まれる火山ガスが、「脱ガス」によって大気中に解放される現象である。さて、大気中の二酸化炭素は、とても水に溶けやすい。雨水や地下水に溶けた二酸化炭素は、「炭酸」（化学式で H_2CO_3 ）となる。炭酸は弱い酸なので、長い時間をかけて地上の岩石を溶かしてゆく。ちなみに地球科学では、この過程を「化学的な風化作用」と呼んでいる。溶かしたされたカルシウムの陽イオン(Ca^{2+})は、川をへて海に流れこみ、炭酸水素イオン(HCO_3^-)と反応する。この結果、炭酸カルシウム(CaCO_3)などの「炭酸塩鉱物」として沈殿するのである。

炭酸塩鉱物と有機炭素の貯蔵

【6】こうして炭酸は、大陸を構成する岩石を徐々に溶かしていく。そして海底に炭酸カルシウムが沈殿するプロセスでは、生物が大きく関与している。すなわち、海に棲む有孔虫や珊瑚などの微生物の活動によって「石灰岩」が形成されるのだ。

ちなみに石灰岩とは、炭酸カルシウムを 50 パーセント以上含む堆積岩のことを言う。
また、大気と海水中に拡散した二酸化炭素は、生物が行う「光合成」によって有機物となる。
ここでは「有機炭素」という形で、気体の二酸化炭素が堆積物として固定されるのである。
さらに、海洋底では炭酸塩鉱物や有機炭素が、プレート（岩板）の沈み込みに伴い、今度は大陸に「付加」されてゆく。
その後、長い年月をかけて陸地に付加されたものの一部が隆起し、地上にさらされて長い時間に風化作用を受ける。
そして残りの堆積物は、沈み込みとともに地球深部まで運ばれる。
今度は、変成作用と火山活動によって、マグマとともに再び地表へ放出されるのである。

【7】ここで堆積岩に炭素が貯蔵される仕組みについて説明しておこう。
約 25 億年前から始まる原生代（25 億～5 億 4000 万年前）以後、地球上では大量の堆積岩が形成されてきた。
その多くは海底であるが、陸上の湖沼や河川でも堆積岩ができた。
なお、グリーンランドの堆積岩は、地球最古と考えられる 38 億年前に海で堆積したものである。
このような堆積岩の形成は、地球上で大陸が成長してきたことと関係がある。
現在の地球には、ユーラシア、アフリカ、北アメリカ、南アメリカ、南極の五つの大陸がある。
いわゆる「五大陸」だが、広大な陸地の上で川によって運ばれた大量の土砂が浅海に堆積する。
なお、27 億年ほど前に地球上で大陸が誕生する前は、陸地を流れる河川の規模が小さかったため、風雨で削られた堆積物がそれほど多く生産されることはなかった。
一方、大陸が成長すると河川も大規模になって、運ばれる土砂が増えてきた。
こうした結果、海底には膨大な堆積岩が形成されることになる。
逆に、過去にできた大量の堆積岩を見て、当時かなり大きなサイズの大陸が存在していたと地質学者は判断するのである。
さて、炭酸塩鉱物と有機炭素を構成する炭素の大もとは、冥王代（46 億～40 億年前）の「原始大気」に含まれていた二酸化炭素である。
現在では、炭酸塩鉱物が作られる過程には生物が関与しているが、原始地球では無機的にこのことが行われていた。
その後に誕生した原始的な生物が、およそ 27 億年ほど前から二酸化炭素を光合成に利用し、堆積岩として海底に固定した。
こうして炭素は、大気、海洋、岩石のあいだを、種々のプロセスを通じて大循環してきたのである。

実際の長さの比で表した時代区分 (単位:億年)		地質時代の区分 (単位:百万年)					
		代	紀	世	各期の始まり	各期の長さ	
5・	顕生累代	新生代	第四紀	完新世	・0.01	約1万年	
		中生代		更新世		2.57	
		古生代	新第三紀	鮮新世	・2.58	2.75	
	先カンブリア時代	中生代		中新世	・5.333	17.7	
		古生代	古第三紀	漸新世	・23.03	10.9	
				始新世	・33.9	22.1	
				暁新世	・56.0	10.0	
		中生代	白亜紀		・66.0	79.0	
	ジュラ紀		・145.0	56.3			
	三畳紀		・201.3	50.9			
20・	先カンブリア時代	古生代	ペルム紀		・252.17	46.7	
			石炭紀	ペンシルベニア紀	・298.9	24.3	
				ミシシッピ紀	・323.2	60.0 35.7	
		デボン紀		・358.9	60.3		
		シルル紀		・419.2	24.2		
		オルドビス紀		・443.4	42.0		
		カンブリア紀		・485.4	55.6		
		原生代	新原生代	*エディアカラ紀 (635.0~541.0)		・541.0	約20億年
			中原生代			・1000	
			古原生代			・1600	
35・	始生代 (太古代)	新始生代 (新太古代)		・2500	約15億年		
		中始生代 (中太古代)		・2800			
		古生代 (古太古代)		・3200			
		原始生代 (原太古代)		・3600			
40・	冥王代 (非公式)	冥王代 (非公式)			・4000	約6億年	
45・							

フィードバック機構と動的平衡

【8】数十億年という時間スケールで見ると、大気に含まれる二酸化炭素の濃度は、時とともに減ってきた。

しかし、必ずしも単調に減少してきたわけではなく、増減を繰り返しながら全体として徐々に低下したのである。

この途上では、二酸化炭素が炭酸カルシウムに固定される速度と、火山活動などによって大気中に放出される速度とが、ほぼ等しくなっている。

すなわち、長い期間には両者が釣りあうように調整されており、炭素循環システムは「平衡状態」にある。

細かく見ると、こうした平衡状態よりも二酸化炭素濃度が高い時期は、大気を温暖な状態に維持する「温室効果」が卓越するために「温暖期」になる。

反対に、二酸化炭素濃度が低い時期は「寒冷期」となるのだ。

こうした濃度の「ゆらぎ」は、地殻変動など地球上のさまざまなイベントによって引き起こされてきた。

【9】地球の誕生以来、現在まで環境が安定に維持されてきた背景には、こうしたフィードバックの機構がある。

ちなみに、二酸化炭素が増えた後、一方的にさらに二酸化炭素が増えることを「正のフィードバック」、その反動で二酸化炭素が減ることを「負のフィードバック」と呼ぶ。

一般に、何かの変化が生じた場合に、その変化をさらに進めるような働きが起きることを「正のフィードバック」と呼ぶ。

その反対に、こうした変化を妨げるような働きが起きることを「負のフィードバック」と言う。

地球科学ではさまざまな変化現象にこうした正負のフィードバックが起きていることを確認している。

特に、炭素循環に見られる負のフィードバック機構は、提唱者であるミシガン大学のジェイムス・ウォーカー博士の名前に因んで「ウォーカー・フィードバック」（気候システムの安定化機構）と名づけられている。

ウォーカー・フィードバック

【10】ウォーカー・フィードバックでは、地球上の物質の化学的な変化が問題となる。

一般に、化学反応には温度が大きく関わってくる。

これは実験室の試験管中の化学反応とまったく変わらない。

すなわち、高温であれば速く反応し、低温であれば遅く反応する。

身近な例では、水に食塩を溶かすとき、冷たい水よりもお湯のほうがすぐに溶けるのと同じである。

これと同様に、化学的な風化も高温では速く進み、低温では遅くなる。

よって、以下では「温度」というキーワードでウォーカー・フィードバックの仕組みを見ていこう。

化学的風化作用が起きるとき、もし何らかの理由で大気中の温度が上昇すると、風化が速まって大気中から二酸化炭素が減ってゆく。

そして二酸化炭素の濃度が低下すると、大気中の「温室効果」が減少し、気温は低下することになる。

これと反対に、気温が低下した場合には、風化作用が抑制されるため、二酸化炭素の消費が減って大気中の濃度が上昇する。

そして二酸化炭素が増えると、温室効果によって気温は上がることになる。

【11】これがウォーカー・フィードバックのメカニズムであるが、その本質は、温度が上昇すれば下がる方向に働き、温度が低下すれば上がる方向に動く、という点である。

ここに火山活動が関与することもある。

たとえば、たとえば、噴火が活発化し二酸化炭素の供給が増えると、一次的に温暖化に向かう。

二酸化炭素の供給が生物の消費量を凌ぐと、温室効果を持つ二酸化炭素は地球を温め、やがて化学反応が加速される。

こうなると陸上の風化作用が促進され、海水中にカルシウムなどの陽イオンが大量に供給される。次に、海水に溶けていた二酸化炭素と陽イオンが反応し、炭酸カルシウムとして沈澱し、海水中の二酸化炭素が消費されてゆく。

これが続くと、大気中の二酸化炭素が海水に溶けはじめて濃度が減る。

すなわち、「負のフィードバック」によって二酸化炭素は減り、地球は寒冷化に向かう。

つまり、一次的に温暖化に向かっていたのが、最後には寒冷化に至る、というのがポイントである。

これとは逆のことも起こる。

地球全体の火山活動が不活発になると、二酸化炭素の放出が減る。

そのため気候は寒冷化し、氷河時代が到来する

この結果、地上の風化作用が停滞し、やがて大気中の二酸化炭素濃度が上がってくる。

この結果、地球環境は再び温暖化へ向かい、もとの平均的な気候へ戻ってゆく。

こうしたプロセスを経て、二酸化炭素は長いあいだに供給と消費の釣りあった平衡状態に保たれてきたのである。

【12】シーソー式のウォーカー・フィードバックは、大きな変動を自動的に抑制し、数万～数十万という期間に環境を安定化させるように働いてきた。

地球の誕生以来、現在まで環境が維持されてきたのは、こうした精妙な「負のフィードバック」機構のおかげなのである。

しかも、物質が絶えず出し入れされながらも平衡が保たれる、という一見不思議な現象が起きている。

「動的平衡」とも呼ばれるが、平衡そのものが自律的にダイナミックに機能しているとも言えよう。こうした理解は、地球を一つのシステムとしてまるごと捉えることによってはじめて可能となった。

地球温暖化問題の捉え方

【13】現在、世界で問題となっている地球温暖化は、大気中の二酸化炭素濃度の増加が原因ではないか、という議論がある。

というのは、二酸化炭素には先に述べたような温室効果の機能があるからだ。

産業革命以後、人類の産業活動によって大量の二酸化炭素が放出されたことは事実である。

ところが、地球システム全体のなかでは、炭素が循環、移動、拡散するほうがはるかに大きいのである。

たとえば、火山噴火は定量的に見ても大きく炭素循環に関与している。

活火山からは日々、火山ガスとして大量の二酸化炭素が放出されている。

計算によると、現在の大気中に存在する二酸化炭素の量は、世界中に 1500 個ほど存在する活火山から、約 1 万年間に排出される二酸化炭素の総量と等しい。

また、海水に含まれる二酸化炭素は、約 50 万年間に火山ガスとして排出される量に匹敵するという。

それほどまで二酸化炭素が放出されつづければ、地球上では私たち生物はたちまち生きていけなくなるように思う。

しかし、現実にはそうならないのは、地球内部で大規模な炭素循環があるからだ。

長い時間軸のなかで炭素はフィードバック機構を経ながら循環し、大気中の二酸化炭素濃度が決まってきた。

地球史を振り返ると、現在の二酸化炭素濃度は、寒冷期にあたる非常に低い水準にある。

たとえば、氷河時代があった石炭紀（約 3 億年前）の大気中の二酸化炭素の濃度は、現在と同じような低いレベルだった。

したがって、温室効果ガスの放出が原因の一つとされる地球温暖化問題も、地球全体の長い時間軸で見ると、再び氷河時代に向かうなかでの一時的な温暖化と言っても過言ではないのである。

【14】地球環境が安定する条件を知るには、固体地球（岩石圏）と流体地球（水圏と気圏）の相互作用としての動的平衡を理解することが、きわめて重要になる。

具体的には、数年～数十年の短時間スケールの炭素循環を支配しているのは、海水中の二酸化炭素の溶解量や、森林とプランクトンによる炭素固定量など、大気、海洋、生物のあいだで交わされる小規模の循環である。

地球の大気は、周りの状態を敏感に感じ取りながら、暴走しすぎたときにフィードバック機構が起きる。

まさに大きな変化を被りそうなときに、動的平衡が働くのだ。

ウォーカー・フィードバックは暴走を止めるシステムであり、システムを恒常的に留めておくのではない。

言い換えると、環境が暴走したときにだけ賢く働くものなのである。

地球科学が明らかにしたフィードバック機構と動的平衡は、私たち生命の維持と調整に関してもきわめて大切である。

【15】38億年前に最初の生命が誕生して以降、生物はみな海のなかで暮らしていた。

その頃の初期地球を取り巻いていた原始大気は、その98パーセントが二酸化炭素からなり、酸素はほとんど存在していなかった。

やがて光合成の機能を持つ藍藻類が出現し、水中の二酸化炭素を酸素に変えていった。

その結果、25億年ほど前から大気中の酸素濃度が顕著に上昇し、生物をめぐる環境が変化しはじめた。

生物が非常に長い時間をかけて光合成を繰り返すことにより、大気中の酸素濃度が現在と同じレベルに達した。

増加した酸素は、大気の構造を変化させていった。

太陽からやってくる紫外線を吸収する「オゾン層」と呼ばれるゾーンが成層圏に形成されたのである。

【16】さらに酸素濃度が上昇するにつれて、オゾン層はより厚みを増していった。

そして4億5000万年ほど前には、生物にとって紫外線の影響がないまでオゾン層が厚くなったのである。

生体に有害な紫外線が吸収されるようになると、生物は陸に上がることができるようになった。

地質年代で見ると、4億9000万年前に始まるオルドビス紀以前の生物は、すべて海のなかに棲んでいた。

その後、植物の上陸が始まり、続いて動物が上陸していったのである。

具体的には、最初にコケ類などの植物が上陸し、次に昆虫類が上陸した。

3億6000万年前には脊椎動物の祖先が上陸を開始した。

これらの生物は陸上でも豊かな生態系を形成し多様に進化していった。

オゾン層とは何か

【17】ここで、オゾン層とはどういうものか、またいかにして形成されたかについて説明しておこう。

オゾン層は現在でも、地球上の生物を守るものとしてきわめて重要である。

オゾンとは酸素原子3個からなる気体で、 O_3 と表記される。

このオゾンは地上からの高度10キロメートルから50キロメートルの範囲に存在する。

ちなみに、地上から高度11キロメートルまでは対流圏、また11キロメートル以上は成層圏と呼んでいる。

対流圏では空気が対流し地上の水分が上昇して雲が形成され、雨となって降ってくる。

それに対して、成層圏には水蒸気は上がることはなく、常に強い横風（ジェットストリーム）が吹いている。

オゾン層は成層圏のなかでも20～25キロメートルの高さで特に多く存在する。

このように成層圏内でオゾンの濃度が高い部分を「オゾン層」と呼んでいるのである。約 27 億年前に最初の光合成生物が誕生して以来、大気中に放出された酸素の一部がオゾンへと変化した。

酸素は太陽から降り注ぐ紫外線によって化学反応を起こすのである。

具体的には、強い紫外線によって酸素分子 (O_2) が分解して酸素原子 (O) となる。

これが周囲にある別の酸素分子 1 個と結合してオゾン (O_3) となる。

こうした化学反応が進む一方、できあがったオゾンは周りに漂っている酸素原子とぶつかり、2 個の酸素分子へ変化する。

すなわち、生成されたばかりのオゾン層が瞬く間に消滅してしまう。

こうして大気中のオゾンは生成と消滅を繰り返しながら、ある濃度で存在している。

つまり、物理的および化学的な条件によって、バランスを取りながら一定の濃度が保たれているのである。

なお、「オゾン浴」という言葉があるように、一般社会ではオゾンは健康増進物質と捉えられることがある。

しかし、実際には塩素よりも強力な酸化作用を持つ有毒な気体である。

微量の場合には皮膚に付いた細菌を分解したり消臭効果があるために利用されている。

また、地上近くの大気に含まれるオゾンは光化学スモッグの原因となることもある。

オゾン層は「レースのカーテン」

【18】 それではオゾン層はいつ形成されたのか。

原始大気中に酸素分子はほとんどなかったため、オゾンもほとんど存在しなかったと考えられている。

その後、大気中で徐々に酸素分子が増えはじめたと同時に、オゾンも生成されたのである。

次に、オゾンが増えることにより、地上へ降り注ぐ紫外線が激減していった。

実は、酸素の増え方に比べてオゾンの増え方のほうが、はるかに大きかったと考えられている。

具体的に見ると、20 億年前の大気中の酸素濃度は現在の 100 分の 1 くらいしかなかったが、オゾンの濃度は現在の 5 分の 1 もあった。

逆に言えば、当時は現在と比べても少なくないオゾンがすでに生成されていたのである。

さて、20~25 キロメートルの上空に存在するオゾン層は、地球を取り巻く大気の割合としては、きわめて少量である。

大気は地表で 1 気圧の圧力があり、上空に行くに従って気圧が下がる。

高さ 5 キロメートルの幅で広がるオゾン層も、20 キロメートルの上空では非常に空気が薄く、また圧力も低い。

ここで興味深い比較がある。

地球を取り巻く大気をすべて 1 気圧にすると、8 キロメートルの厚さとなる。

これに対して、オゾン層を 1 気圧にして見ると、わずか 3 ミリメートルにしかならないのである。

地球大気の 8 キロメートルとは、ミリメートルに換算すると 800 万ミリメートルの厚さとなる。

800 万ミリメートルに対する 3 ミリメートルとは、270 万分の 1 という割合になる。

つまり、全大気の 270 万分の 1 で、地球上の全生命を守っていると言っても過言ではない。

このように非常に薄くて貴重なオゾン層は、きわめて薄い「レースのカーテン」と呼ばれている。

オゾン層の役割と保護

【19】 太陽から地球に降り注ぐ紫外線は、生物を構成する蛋白質や遺伝を司る DNA を破壊するため有害である。

たとえば、人体に対しても皮膚がんや白内障を増やす恐れがある。

オゾン層は地上の生態系を保護するだけではない。

太陽から来る紫外線をここで吸収するため、成層圏自体を温める効果がある。

その結果、地球上の気候にも影響を与えている。

さらに、成層圏にあるオゾンの量は地域や季節によって異なっている。一般に、緯度が高い地域ほど多く、逆に赤道付近は少ない傾向がある。また、春先に増加し秋に減少する傾向がある。ところで、1980年代になってから成層圏内のオゾン量が減少していることが発見された。オゾン層の破壊は地球規模で進行しており、高緯度地域でオゾンの減少が顕著である。オゾン量が大きく減って穴のようになった領域は「オゾンホール」と呼ばれている。1984年に南極上空でオゾンホールがはじめて見つかった。それ以後、毎年秋にオゾンホールが確認され、2000年にはその面積が最大となった。さらに北半球の高緯度地域でもオゾン量の減少が観測されている。2011年には北極で最大規模のオゾンホールが発生し、8割ものオゾンが失われた。

【20】その原因は、フロンなどの人工化学物質がオゾンを破壊することによる。これはクロロフルオロカーボンと呼ばれる物質であり、成層圏で分解して塩素原子（Cl）や臭素原子を発生する。これらがオゾン分子の分解を加速させてオゾン層を破壊するのである。この現象は地球規模の環境問題として世界的に取り上げられることになった。オゾン層が消滅すれば、陸上生物は紫外線にさらされることになり、皮膚病などさまざまな障害が出るだけでなく、突然変異が大量に発生すると予想される。4億年前の状態に戻るわけであり、生態系に大きな異変が生じると考えられる。いったん大気中に放出されたフロンガスは分解されず、数十年ものあいだ対流圏にとどまる。よって、フロンガスが大気中に残っている限り、今後もオゾン層の破壊が続くことになる。こうした事態を憂慮し、1989年にはフロンガスの製造と使用を禁止する国際条約が交わされた。その後、状況は改善し、オゾン層は半世紀ほどかけて回復する方向にある。大気中のオゾンは生物に限らず海と陸にあるすべての物質が関わりながら、生成と消滅が維持されている。こうしたバランスを崩す人間活動は、今後も国際的な取り決めによって厳しく制限する必要がある。

5億年前の地球

【21】地球上では活発なプレート運動によって大陸が移動を続けていた。超大陸が集合と分裂を何度も繰り返してきたが、今から5億年ほど前から生物との関連が生じるようになった。地上に植物が生育するようになって、それまで無機物の岩塊であった地表の姿が変わってきたのである。地球にはすでに大陸が生まれていたが、その上には生物はまったく存在していなかった。現在でも地球上の動物のなかで陸上生活を行うものは4分の1にしかすぎない。すなわち、生命にとっては海のほうがはるかに棲み心地がよいのである。事実、地球誕生から40億年という長いあいだの陸地は、地面が完全にむきだしになった荒れた地であった。よって、古生代の地球上でも、豊かな生命が溢れていた海洋とは異なり、生命が皆無の荒涼とした陸地が広がっていたのである。

【22】そもそも5億年以前にできた陸地には土壌がなかった。土壌とは風に乗って飛んできた細かい石のかけらや植物の枯死したものが溜まったものである。現在の地上の大部分はこうした土壌に覆われている。ところが、5億年前の陸上にあったのは、岩石と砂からなる荒れた大地だった。その上には強烈な紫外線が太陽から降り注いでいた。そして4億年ほど前になると、その頃すでに出現していた2つの大陸が近づきはじめた。大陸が衝突する場所では地面がゆっくりと隆起し、現在のヒマラヤ山脈のような巨大な山が出現した。

こうした地殻変動は「造山運動」と呼ばれており、これによって大陸上に「造山帯」と呼ばれるいくつかの巨大な山地群ができた。

たとえば、現在のヨーロッパ西部と北米大陸にある長大な山脈は、この時代にできたものである。さて、陸上に長大な山の連なりができると、大気の流れをさえぎることによって気象条件を大きく変化させる。

たとえば、山に沿って上昇した空気から雲が発生し、山を越えた地域に雨を降らせる。

降り注いだ雨は山肌を削りながらいくつもの谷を作り、底には急峻な川の流れが生まれる。

大量の雨は大きな河川を作り、しばしば洪水を引き起こす。

こうして扇状地と平野が誕生する。

さらに、大陸の上を幅が数十キロメートルにもわたる大河が流れ、河口に広大な砂州ができた。

このような地形は、何億年もあいた安定していた大陸には見られないものであり、新しい地球環境を作りだした。

すなわち、それまで海に暮らしていた生物にとって、まったく新しい生育環境が誕生したのである。

生物の陸地進出

【23】今から5億年ほど前のオルドビス紀には、成層圏にオゾン層が確立し、有害な紫外線が徐々にさえぎられるようになった。

そして4億2000万年前頃には大気中の酸素濃度は現在の10分の1程度にまで増加した。

その後、現在とあまり変わらない厚さのオゾン層が形成され、生物が上陸できる地表環境が整ってきた。

それまでの生物を紫外線から守るものは水だけであった。

すなわち、水深10メートルよりも深い海でないと生育できなかったのである。

水中生物の光合成により、大気中の酸素濃度が現在の100分の1程度まで増加すると、生物は水深1メートルまで棲息が可能になった。

ちなみに、現在の100分の1という酸素濃度は「パスツールレベル」と呼ばれており、生物が酸素呼吸を行う閾値となっている。

具体的には、生物が体内でエネルギーを得るため、発酵から呼吸へシステムを変えるのに必要な酸素レベルである。

【24】「発酵」とは微生物の働きによって酸素なしに炭水化物を分解し、低分子の有機物を作り出す現象をいう。

このとき生物体は発酵によって酸素のない状況でも必要なエネルギーを得ることができる。

一方、酸素が得られる状況になったことを利用して、生物体は「呼吸」を採用するようになった。この新しいシステムによって、生物は何十倍も効率的にエネルギーを獲得できるようになったのである。

カンブリア紀の大爆発以後の生物がさらに進化を推し進めてきたのも、酸素呼吸のおかげであると考えられている。

さて、オゾン濃度が現在の10分の1程度に達したのは、約5億年前以降である。

これは植物が上陸する少し前にあたる。

体のつくりを変えることに成功した植物が、次第に陸へ上がっていった。

陸の厳しい環境で生き抜くため体の構造を変えながら陸上の生活に適した仕組みを作りあげていったのである。

他の生物との激しい生存競争を避けることによって、広大なニッチ（生態的地位）のなかで自分たちの種の繁栄を図ることに成功した。

石炭の生成

【25】上陸後の植物はさらに進化を進め、体をしっかりと支える根、茎、幹、また光合成を効率よく行う多数の葉が発達した。

その結果、3億9000万年前には、地表を這う灌木だけでなく何メートルもの高さを持つ直立した高木まで誕生した。

さらに植物の繁殖システムも変化した。

原始的な植物はすべて孢子を散布することによって繁殖する植物だった。

ところがデボン紀に入ると、種子を持つシダ種子類が誕生した。

「裸子植物」と呼ばれるものだが、現在の樹木と同じ木質部を持つ植物である。

こうした植物が大陸の奥地まで繁殖した結果、デボン紀の終わりにはシダ植物が森を作りはじめた。

その後の石炭紀には、超大陸の至るところに森林が作られるようになった。

3億5000万年前頃には地球最初の大森林が誕生した。

また、約3億年前にはシダ植物が大繁盛し、現在化石燃料として使われている石炭になった。

当時の陸上で生育した大量の植物の遺骸は、そのまま湿地に埋積された。

この時代には微生物が進化していなかったため、セルロースでできている木質部は十分に分解されずにそのまま地中に残った。

地中に埋もれた植物遺骸は何千万年も堆積し、この間に地熱とちあつによって炭質部分が石炭へ変化していった。

世界中で採掘されている良質の石炭は、この時期にできたものである。

換言すれば、それほどまでの時間をかけて作られた地球の恵みを、人類はわずか200年ほどで大量に燃やし尽くそうとしているのである。

植物上陸の意義

【26】既に述べたように、6億年ほど前には大気中の酸素濃度が上昇しはじめた。

その結果、成層圏に形成されたオゾン層が太陽から降り注ぐ紫外線を遮断し、陸上で生物が暮らすための条件がそろってきた。

その後の生物の変遷を時間を追いながら見ていこう。

最初に陸上の生活を始めた植物はコケ植物であり、4億7000万年前頃に繁殖していた。

この後にシダ植物も出現し、最初の森林が3億8000万年ほど前に現れた。

これらは孢子で子孫を残すシダ植物の一種でありデボン紀の陸上の各地で繁茂した。

【27】樹木を形成するような大型植物の下には土壌が形成され、植物の遺骸などの有機物が溜まっていった。

すなわち、生物の遺骸が分解した炭素などの化学物質が土壌に蓄積されたのである。

この土壌は生物体の構成物を蓄積するだけでなく、地球全体のなかで循環させるための大きな貯蔵庫となった。

さらに土壌が雨によって流されると、ここに蓄積された有機物が川を經由して海へ流入し、海の生物へ栄養補給を行うことになった。

こうして陸上を森林が覆うことによって、地球全体の生態系が徐々に変化していったのである。

森林の出現は下にできた土壌に暮らす生物の生活空間を飛躍的に増やした。

これによって植物と動物を問わず、昆虫などに多様な種が誕生した。

【28】さらに、土壌は大気中の二酸化炭素をコントロールする働きを持つようになった。

二酸化炭素の吸収と放出をになっていったのである。

過去4億年にわたる大気中の二酸化炭素を見てみよう。

二酸化炭素の濃度はデボン紀の終わりから石炭紀にかけて急激に低下している。

具体的には、当時の濃度は現在よりも一桁も多かったのであるが、数千万年の時間をかけて5分の1まで下がったという事実がある。

この原因は、陸上を覆った土壌が化学的に二酸化炭素を吸収した効果と、繁茂した植物の行う光合成による吸収効果の両方が考えられている。

こうして、デボン紀以後に地上に現れた土壌の拡大は、生物の棲める空間を増やしただけでなく、環境の急激な変動を吸収する役割を果たすようになったのである。

動物の上陸

【29】植物の上陸に続いて、約4億年前頃から昆虫類が地上に進出した。生物の分類上、昆虫類は無脊椎動物の「節足動物」に含まれている。昆虫など節足動物をはじめとする無脊椎動物が上陸した後、デボン紀(4億1000万～3億6000万年前)の後期になると脊椎動物が陸上に進出する。淡水に棲息していた魚類のなかから両生類が出現し、上陸していった。両生類はカエルの仲間であり、水陸という二つの異なる環境で生活することができる。その後、両生類から爬虫類が進化していった。

【30】脊椎動物が海水から淡水を経由して陸上で生活するには、数多くの課題があった。海と陸とでは環境が激変する。動物が上陸するためには、水中での泳ぎから陸上での歩行へ、またエラによる呼吸から肺による呼吸へと、完全に異なるシステムを持つことが必要だった。(ここでは詳しい説明を割愛するが、)このような劇的な変化に適応するポイントは3点ある。すなわち、浸透圧の変化、肺呼吸、重力からの脱却、の3つである。

イクチオステガの陸上進出

【31】大西洋北部のグリーンランドにある3億6000万年前の地層から、最初に陸上へ進出した脊椎動物の化石が発見された。イクチオステガと呼ばれるもので、魚類の一部が進化した両生類の仲間である。イクチオステガの体の構造は現在の陸上にいる脊椎動物とほとんど同じだった。すなわち、4本の足と背骨や肋骨を持っており、乾燥と重力を克服しはじめたと考えられる。ちなみに、3億6000万年前とは、時代としては石炭紀(3億6000万～2億9000万年前)の冒頭にあたり、ここから湿潤な熱帯気候が始まる。おそらくシダ植物の森林が広がりはじめた高温多湿の水際で、陸地での生活が始まったのであろう。この頃から大気中の酸素濃度が上昇し、現在見られるような濃度21パーセントのレベルまで回復しつつあった。こうした酸素濃度の変化も、生物の上陸を後押ししたと考えられる。イクチオステガは私たち哺乳類の遠い祖先でもある。その偉大な陸への第一歩によって陸上動物の歴史は始まった。その後の脊椎動物は短期間に大きな進化を遂げ、活動域を拡大していった。この第一歩を踏み出すまでには、1億年以上にもわたる魚類のさまざまな進化への挑戦があったのである。

【32】魚類が肺の機能を持ちはじめたことによって、他にも重要な変化が生まれた。魚の咽喉はエラ呼吸を行うための水の通路であると同時に、食物としてのエサを流しこむ通路でもある。すなわち、咽喉は食道でもあり、呼吸と消化の両方に用いる共通の器官であった。そこで魚類が原始的な肺を使った空気呼吸を行うようになると、食道とは別個に呼吸用の気道が必要になった。すなわち、空気用の通路と食物用の通路が交叉しないように、空気と食物を別々に通す仕組みができたのである。その後、鼻腔が長い年月をかけて口と連結し、肺呼吸のための空気吸入口となった。そして食道につながった消化器が、次の重要な進化の担い手となった。動物が消化器の機能を増強させることによって、生存域を飛躍的に広げることに成功したのである。すなわち、元来は肉食だった動物が、植物を食べはじめたのである。

【33】光合成のできない動物は絶えず外部にある栄養源を食べることによって生体を維持しなければならない。

すべての動物に食物を奪いあう敵対者が存在し、苛酷な生存競争を生き残るために動物はさまざまな能力を身につけていった。

エネルギーを獲得するシステムとして、草食は肉食よりもはるかに効率が悪い。

ところが、動物数が増加すると肉食のみで食物連鎖を維持するのは困難になる。

そこで動物は食物調達にさほど苦勞のいらない植物を食料として選択した。

そのために元来は肉食用であった消化器を、摂取した植物を消化し吸収するために作り変えた。

具体的には、植物が光合成によって蓄えた澱粉などの炭水化物を栄養源とした。

澱粉の含まれる根や葉や種を噛み砕き、消化器で溶かして吸収したのである。

これに加えて、澱粉より栄養価が低いが、植物中に大量にあるセルロースを消化、吸収できるようにした。

セルロースを消化管のなかで分解するにはセルラーゼという分解酵素が必要となる。

しかし、動物自身は体内でセルラーゼを作ることができないので、セルロースを分解し栄養としている微生物を体内に飼う戦略を取った。

消化管のなかでこの微生物にエサを食べさせることで、動物が利用できるセルロースの分解物を得ることに成功した。

これこそ動物が必要に迫られて最初に行った「共生」なのである。

【34】こうして草食行動が始まり、動物は植物が生育できる限界まで自らの生存域も拡大していった。

植物を食べられるように体を改革してから、地上の動物はさらなる進化を遂げていったのである。

さて、地質学的に見ると、草食動物では最古の化石が、石炭紀後期にあたる3億1500万年前の地層から発見されている。

これは「エオカセア」と名づけられているが、昆虫を除いて最古の草食動物としての骨格的特徴を持つものである。

草食動物が出現する前の陸棲動物は、昆虫を食べたり互いに共食いしていたと考えられる。

食料調達のため、こうした行動以外の選択肢が生まれたことは、脊椎動物にとって革命的な出来事だったと言えよう。

これをきっかけに草食動物は繁殖を繰り返して数が増加し、引き続き残っていた捕食動物の食糧源にもなった。

最古の草食動物エオカセアは、数量としてはもっとも多い草食動物が、食物連鎖の最上位を占める少数の捕食動物を支えるという生態系の基盤を作った。

すなわち、地球全体で生物の生産量が飛躍的に増加する源を作ったとも言えるのである。

植物がもたらす膨大な食用資源を、動物が直接的に利用できるようになったことは、その後に誕生した人類が、約1万年前に農業を「発明」したこと以上の大事件なのである。

【35】デボン紀に誕生した両生類は、そののち爬虫類、鳥類、哺乳類へと形態と機能を飛躍的に変えながら進化していった。

こうした脊椎動物の歴史は、海から独立するための歴史とも見なすことができる。

もし、生物が水中生活から抜け出ることがなければ、今の地球上に見られるような多種多様な生物群は存在しなかつたらうと言われている。

水中からの脱却は、われわれヒトの誕生時にも行われている。

動物の発生は、過去に経てきた進化の過程をたどる、ということが生物学で知られている。

ドイツの生物学者エルンスト・ヘッケル（1834～1919）が19世紀に提唱した考え方で、「個体発生は系統発生を繰り返す」と表現される。

■■ブルームの冬と生物大量絶滅■■

【36】地球の歴史には古生代、中生代、新生代という区分がある。生物が出現した後に対して付けられた名前だが、それぞれの時代の最後に生物が一度に死滅するという事件が起きている。これは「大量絶滅」と呼ばれる現象だが、地球上に出現した生物の9割以上は絶滅の道をたどるのである。逆に言えば、生物は絶滅することで新しい種に生存の場を提供してきたとも言える。一般に、大量絶滅は生物界を取り巻く外部の急激な環境変動によって起こる。それまで繁栄していた生物には大きな打撃をもたらすが、そのおかげで新しい種が生息できる生物界では「ニッチ」と呼ばれる生態的な地位は絶えず変化している。これに従って、新しい環境に適応できる種が生まれる一方、古い種は次々と姿を消してきた。具体的には、陸上に棲息する植物と大型動物、また海洋に回遊する魚類やプランクトンが世界中で一斉に絶滅するのが大量絶滅であり、オオサンショウウオ、トキ、パンダなど現世の希少種が絶滅する現象とは区別される。こうした繰り返しは不変に起きてきたが、一方で生物の絶滅は一定の割合で発生しているわけではない。非常に多くの種が短期間に絶滅する場合と、ゆるやかに絶滅が進行する場合とがある。前者が大量絶滅と呼ばれるものであり、地球の歴史では過去5億年のあいだに、すべての生物種の5～9割が短期間で死滅する事件が何度か起きてきた。

5回の大量絶滅

【37】地球上に誕生した生命が遭遇した規模の大きな絶滅は5回ある。それぞれオルドビス紀、デボン紀、ペルム紀（二畳紀）、トリアス紀（三畳紀）、白亜紀の末期に起き、その時代を終わらせたものだ。1番目の大量絶滅はオルドビス紀の末に起きたものである。すなわち約4億4000万年前に、古生代2番目のオルドビス紀が終了し、3番目のシルル紀が開始する画期となった。このときには大規模な氷河作用が発生し、陸上にある水の大部分が凍結した。そして地上に降った雨は陸地の上に固定され、海に流れこむ水量が激減した。その結果、海面の水位が著しく低下し、海棲生物の多くが絶滅した。具体的には、オルドビス紀に全盛期を誇っていた頭足類のオウムガイ、腕足動物、三葉虫などの多くが死滅した。また、三葉虫の種は半減した。地球上の海と陸の配置を見てみると、北半球のほとんどは海に覆われ、南半球の陸地も Gondwana 大陸だけとなった。そして大陸が衝突することによって巨大な山脈が複数現れた。これに伴って河川の規模が大きくなり、大河がいくつも生まれた。Gondwana 大陸が南極へ大陸移動するにつれて、陸上の気温が低下していった。その結果、大規模な氷河が海岸沿いへ広がり、さらに海面へ張りだしていった。陸地と浅海に大氷河が形成された結果、海で生育していた生物に大量絶滅が発生したのである。

【38】2番目の大量絶滅は、デボン紀の末期に起きたものである。約3億6000万年前に、古生代4番目のデボン紀が終わり、5番目の石炭紀が始まった。デボン紀の気候は全体として温暖であったが、その末期には大規模な寒冷化の影響で、海に暮らす生物の7割が死滅した。具体的には、海では甲冑魚をはじめとして軟骨魚や硬骨魚が大量絶滅し、水辺では原始的な両生類が繁殖していたが一挙に衰退した。こうした状況は、地球上の海陸の配置を見てみると、よくわかる。デボン紀から石炭紀にかけて、北米大陸、ローラシア大陸、バルティカ大陸などの陸地が衝突して、一つの巨大な大陸となった。

また、南極付近にあった超大陸ゴンドワナがゆっくりと北上し、これらの大規模な地殻変動が造山運動の最盛期を作り出したのである。

一方、広い面積を占めていたイアペタス海は消滅した。

デボン紀を通して比較的温暖であり、乾期と雨期が交代する気候が形成された。

そのため乾燥気候に適応したシダ種子植物が出現し、植物を食物とする昆虫が陸上に現れた。

デボン紀末には、先に述べた四足の両生類イクチオステガも陸上進出を始めたのである。

デボン紀を終わらせた大量絶滅は、意外にも非常にゆっくりと進行していた。

すなわち、2000万年もの長期間をかけて生物は絶滅していったのだが、そのあいだには数十万年という一桁規模の小さな時間の気候変動が繰り返されていたことがわかっている。

デボン紀の末期に始まった石炭紀から、陸上には植物が繁茂し大森林が形成されるようになる。

【39】3番目の大量絶滅はペルム紀の末期に起きたものである。

2億5000万年前に起きたもので、ペルム紀とトリアス紀を地質学的に分けた。

これは史上最大の大量絶滅で、古生代のほとんどが死に絶えたと考えられている。

4番目の大量絶滅はトリアス紀（三畳紀）の末に起きたものである。

約1億9900万年前に、中生代冒頭のトリアス紀が終わり、2番目のジュラ紀が始まった。

なお、中生代とは爬虫類がさかんに進化し、恐竜が繁栄していた時代である。

中生代に起きた大量絶滅

【40】海と陸の配置を見てみると、トリアス紀の一つ前のペルム紀（二畳紀）前には、すべての大陸が集まって超大陸パンゲアが形成されていた。

その後、ペルム紀の末期になると、今度はパンゲアが分裂を開始したのである。

これが3番目の大量絶滅の頃に存在していた海陸の配置である。

そして、この時期に起きていた環境の激変によって、トリアス紀の始まりからしばらくのあいだ、酸素濃度の低い状態が続いていた。

その後、酸素濃度が上昇すると、爬虫類の時代が始まった。

水中生活から離れられない両生類に代わって陸上生活が可能になった爬虫類の種が増加し繁栄していった。

【41】トリアス紀の後期には再び酸素濃度が低下した。

トリアス紀末に陸と海の両方で大量絶滅が起こり、約8割の種が絶滅した。

陸棲と海棲の生物を比べると、絶滅した時期は陸棲生物のほうが数百万年早かった。

大量絶滅の原因は大洋の海底で起きた巨大な火山活動であった可能性が高い。

すなわち、2億年ほど前に大西洋底の中央海嶺で玄武岩溶岩が大量に噴出した。

いわゆる「洪水玄武岩」の巨大噴火であるが、これによって海の環境が激変し海棲生物の2割以上が絶滅した。

この影響は海洋にとどまらず、陸上の両生類や爬虫類も姿を消した。

そのほかに大量絶滅は小惑星の衝突によって起きたという説もあるが、裏付ける証拠としてのクレーターは発見されていない。

【42】5番目の大量絶滅は白亜紀の末に起きたものである。

中生代の恐竜が絶滅したことでも有名である。

約6500万年前に、中生代最後の白亜紀が終了し、新生代冒頭の古第三紀が始まった。

中生代を代表する恐竜やアンモナイトなど生物種の7割以上が絶滅した。

大量絶滅の原因はメキシコ沖に落下した巨大隕石であることが確認されている。

衝突で発生した火災と粉塵によって、地球全域で大幅な気温の低下が起こったのである。

急激な気候変動が絶滅を誘発した説がもっとも有力である。

その後に新生代が始まり、哺乳類の進化と繁栄へとつながった。

地球科学のなかでも多方面からくわしい研究が行われているテーマでもある。

実際には、過去に起きた5回の大量絶滅のなかでは、もっとも規模の小さなものである。

史上最大の大量絶滅

【43】過去5億年のあいだに発生した大量絶滅のうち、2億5000万年前に起きた3番目の絶滅は史上最大級の大量絶滅事件であり、地質学ではP/T境界と呼ばれている。

P/T境界とは、古生代末のペルム紀のPと、中生代初めのトリアス紀のTの境目の時期という意味である。

化石をくわしく調べてみると、海に棲む生物の96パーセントが絶滅し、全生物種で見ると90～95パーセントが絶滅したと絶滅したと考えられる。

2億9000万年前から2億5000万年前まで続くペルム紀に、超大陸パンゲアが現れたが、こうした超大陸の出現は気候に劇的な影響を及ぼし、生物界が影響を大きく受けたのである。

【44】P/T境界の生物変遷をくわしく見ると、海底に棲んでいた三葉虫やサンゴ、また海中を漂っていた有孔虫野砲山中などのプランクトン、さらに陸上でも植物と昆虫が一斉に絶滅した。

古生代に繁栄を誇っていた三葉虫は、この時期にすべて死に絶えたのである。

その結果、P/T境界から古生代型の生物から現代型の生物へと、生物界のニッチが大きく変化した。

この大量絶滅は生命史上最大であることから、さまざまな分野の研究者がその原因について調査を行っている。

その結果、この絶滅は数百万年という長時間にゆっくりと進行し、そのなかではカタストロフィック（破滅的）な現象が2回あったことがわかってきた。

すなわち、単一の事件で古生代が終わりを告げたのではなく、2件の独立した絶滅事件が合わさって大量絶滅を引き起こしたと考えられている。

【45】最後の絶滅は2億5000万年前に起きたが、それよりも800万年前に大きな環境変化が起きていた。

年代で言うと2億6000万年前であり、地質学の区分ではペルム紀の中期の「ガダルーブ世」

（Guadalupian）と後期の「ローピン世」（Lopingian）境界にあたる時期である。

最初の絶滅事件が起きた2億6000万年前は、これらの頭文字を用いて「G/L境界」とも呼ばれる。

実は、G/L境界で見つかった絶滅の規模は、最後のP/T境界の絶滅に匹敵する大規模なものだった。

特に海底で暮らしている無脊椎動物が大きな影響を受けたのである。

具体的には、サンゴや二枚貝など暖かい海に棲息していた生物が徐々に消えてゆき、同時に赤道付近の暖海へ移動するという現象が始まった。

すなわち、この時期に地球全体で大幅な気温低下が起きたのである。

そして、2億5000万年前の最後のP/T境界へ向けて、たくさんの種類の生物が死滅していった。

すなわち、生物の多様性がだんだんなくなり、少数の生物種しか生存できなくなってきたのである。こうしたなかで、800万年後に起きたP/T境界にあたる最後の絶滅事件が、生物界にとどめを刺した。

そして古生代を終わらせるほどの大量絶滅となったのは、G/L境界とP/T境界という二つの事件がそれほど時を置かずに短い間隔で起きたからではないか、と考えられている。

多種類の環境変動

【46】G/L境界では、他にもいくつかの異なる環境変動が起きていたことがわかってきた。

たとえば、海水の変化、火山の活動、地球の磁場の変化、といったまったく違った現象が近い時期に発生していたのである。

実は、こうした現象は、大型生物が進化を始めたカンブリア紀から現在までを振り返っても、まれな事件であった。

しかも、それらが同時期に起きて複合災害となったことが、古生代末の大量絶滅に関する特異な点なのである。

地球全体の寒冷化

【47】古生代は全般的に温暖な気候が支配していたが、終わり頃に寒冷化した。

その後は中生代に再び温暖化したのだが、古生代末の気候変動は生物にとって致命的なほど激烈なものだった。

この時期の変動には、地球全域にわたって発生した大規模な寒冷化（グローバル寒冷化）と、海水準の極端な低下、という二つの特徴がある。

まず、グローバル寒冷化の証拠を見ていこう。

石炭紀の末期からペルム紀（二畳紀）の前半にかけて堆積した地層を調べると、大規模な氷河が形成された痕跡がある。

石炭紀後期にあたる3億3000万年前に形成された地層には氷河堆積物が残っている。

すなわち、南半球の Gondwana 大陸上を巨大な氷床が覆っていたことを物語る。

こうした古生代の石炭紀後期からペルム紀中期にかけて地球全体が寒冷になった時期は、氷河が広く覆っていた大陸の名前をとって「Gondwana 氷期」と名づけられている。

一般に、氷期には地球上の水分が陸上に氷として固定されるため、海の水が少なくなる。

その結果、世界中の海水面が下がって「海退」が起きる。

海水面の上下は「海水準レベル」と表現されるが、海水準レベルが最低になったのは、この Gondwana 氷期のピーク時ではなかった。

少し遅れて G/L 境界の直前に海水準レベルがもっとも低くなったのである。

具体的には、平均的な海水準レベルより 200 メートルも低いもので、古生代の含まれる顕生代全体を通じて最低レベルにまで低下した。

このことは、ペルム紀中期末に、地球全体にわたる急激な寒冷化があったことを示している。

では、グローバル寒冷化の原因はなんだったのだろうか。

放射線と雲の発生

【48】地球規模の温暖化や寒冷化は、大気中の二酸化炭素の濃度が主要な原因であることがわかっている。

こうした知見は 20 世紀の地球科学の成果だが、21 世紀になってから新しい視座で気候変動の原因を究明する研究が始まった。

大気中に発生する雲の総量が、地球表面の寒冷化を決定するのではないかというデータが出はじめたのである。

雲の形成は大気外の宇宙からやってくる放射線が関与していることが明らかにされた。

これは「銀河宇宙放射線」(galactic cosmic radiation) と呼ばれるもので、GCR と略される。

宇宙を飛び交っている高エネルギー粒子の一種である。

放射線は大気分子に電気を帯びさせる性質がある。

そのため大量の放射線が流入すると、広域にわたって雲が発生する。

すなわち、放射線によって大気を構成する分子の電離が起これ、水滴や氷床の核ができる。

これが大量の雲となって、太陽光の入射量を低下させる。

その結果、地上の平均気温が下がる。

したがって、放射線の流入が多い日が続くと地表は寒冷化に向かうのである。

その反対に、流入が少ない場合には、快晴が続いて地表は暖かくなる。

【49】こうした大気中への放射線の流入量は二つの項目で決まる。

一つ目は宇宙にあるもので、超新星の爆発によって発生し地球まで飛んでくる放射線の量である。

二つ目は地球と太陽の持つ地場の強度である。

地球の磁場は磁気シールドとしての役割があり、磁場が十分に強いときには銀河宇宙放射線は大気中へ入りこむことができない。

その結果、雲の発生が抑制されるのである。

地球の磁場は外核を構成する液体金属が対流することによって生じる。

この対流が安定している場合には磁場も一定の強さで磁気シールドとしての役割を果たすが、対流が乱れると磁場の強度が低下する。

地球磁場はN極とS極が反転する現象がしばしば起きてきたが、反転のさなかに磁場の強度はゼロになる。

これは「地磁気の逆転」と呼ばれるが、逆転時期に向けて磁場は徐々に弱まる。

このときに大気中の雲量が増加するのである。

地磁気の逆転

【50】近年の研究で、地磁気の逆転がG/L境界の頃にも起きていたことがわかってきた。

地層として残された火成岩や堆積岩には、それらができたときの磁場の情報が記録されている。

これは「古地磁気測定法」と呼ばれる地球科学に特有の手法である。

野外で採取してきた岩石の磁気を、実験室で測定することによって、過去に起きた地磁気の強度や逆転時期がわかる。

その結果、20億年以上も前から逆転が比較的頻繁に起きていたことが判明したのである。

こうした逆転のパターンや頻度は、地球の歴史を通じて一定ではなく、時代ごとに特徴があることもわかってきた。

たとえば、石炭紀の後半からペルム紀（二畳紀）の中期までの5000万年くらいのあいだは、逆転があまり見られない。

長期にわたり磁場が比較的安定していた特異な時代であった。

ちなみに、この時期は現在とはN極とS極が逆の「カイヤマン逆磁極期」と呼ばれている。

そしてカイヤマン逆磁極期は、G/L境界の500万年ほど前に終了した。

その後は、地磁気が頻繁に反転を繰り返すようになり、G/L境界に突入したのである。

【51】こうした地磁気の劇的な変化は、「イラワラ事件」（イラワラ・リバーサル）と呼ばれている。

この頃に全地球規模の寒冷化が起きているため、何らかの因果関係があったと考えられる。

おそらく地球の磁場を生成する地磁気ダイナモ（発電機）に大きな変動が起き、地磁気が頻繁に反転するようになったのだろう。

イラワラ事件は、超大陸パンゲアの直下で起きたコールドブルームの活動と関係があると考えられる。

すなわち、上部マントル内に沈み込んだ海洋プレートの残骸が、さらに下部マントルのなかを深く沈むことによって、大規模なコールドブルームが生じた。

これが下部マントルと外核の境界に達すると、外核内の液体金属の対流に変動を与え地球磁場の安定を崩した。

こうした現象が、地球外から降り注ぐ銀河宇宙線の遮断を減少させたため、地球規模の寒冷化が始まったと考えられるのである。

そして長期間にわたる気候の寒冷化が、生物の生存に大きな影響を及ぼした。

環境の変化に適応できなかった種は根絶されてゆき、そのニッチを埋めるように激変を生きのびた種が次の時代に適応拡散していったのである。

海洋無酸素事件

【52】地球を広く覆う海でも大きな変化が起きた。

この頃の全世界の海中では長期間にわたって酸素が欠乏し、一部では無酸素の状態が続いたのであ

る。

これは「海洋無酸素事件」と呼ばれる大異変で、海に棲息する生物に甚大な影響を与えた。具体的に見ると、この時期の深海で堆積したチャート層と呼ばれる地層中に、2000 万年にわたり海水に溶けていた酸素がほとんどなかった時期がある。

チャートに微量だけ含まれる希土類元素の量や鉄鉱物の成分を測定すると、古生代が終了する P/T 境界をまたいで酸素が激減することが判明した。

海水は世界中とつながっているため、このような酸素不足は地球規模で発生したと考えられる。

地層をくわしく調べると、酸欠状態は深海だけでなく浅海にも及んでいた。

つまり、通常は酸化状態にある海が、ペルム紀（二畳紀）の終わりから長期的に貧酸素環境が継続し、いわゆる還元状態になったのである。

【53】 このように古生代末の G/L 境界から P/T 境界にかけて、複数の異なる項目で異変が起きていた。

他の時代にはあまり見られない特異な現象が、全世界的に、かつ集中的に起き、その後に大量絶滅が発生した。

その原因はいまだに不明だが、こうした現象がたまたま同時に起きたのではなく、何らかの大きな事件の多様な現出ではないかという直感のもと、世界中の地球科学者がこの古生代末に起きた実態を探る研究に取り組んだ。

ホットブルーム

【54】 2億 5000 万年前の P/T 境界で起きた大量絶滅は、これまで述べてきた多岐にわたる変動によって引き起こされた。

そのなかでも、スーパーホットブルームによる超巨大噴火が最大の原因であったと考えられている。大気中にまき散らされた粉塵が何十年にもわたって太陽光をさえぎった結果、急激な平均気温の低下が続いた。

それにより植物の光合成が停止し、食物連鎖によって生きていた動物が次々と死に絶えた。

光合成植物の死滅は大気と海水中の酸素濃度を減らすことになり、好気呼吸を行うすべての生物を危機に陥れたのである。

さらに大量のマグマに含まれていた二酸化硫黄ガスは酸性雨を引き起こし、地球環境が悪化した。大気のみならず海までが汚染されたのである。

このように、放射線の増加による気温低下、食料としての植物の激減、大気と海洋の汚染、海中での酸素欠乏、地球磁場強度の減少、という複数の異なる現象が P/T 境界付近の時期に重なって起きた。

こうして史上最大の大量絶滅が発生し、3億年にもわたり大型生物が繁栄した古生代は幕を閉じたのである。

「ブルームの冬」

【55】 こうした変動を起こす原因の大元は地球内部の活動にある。

すなわち、コールドブルームとホットブルームの二つの動きが原動力となったのである。

ペルム紀（二畳紀）中期末の G/L 境界とペルム紀末期の P/T 境界という二つの時期に、それぞれ地球内部で大きな変化があった。

この発端となった物質は、地球表面の7割を覆っている海洋プレートである。

このプレートは何億年という長期間に地球表面で冷やされてきた。

よって、これが上部マントルのなかへ潜り込んだ際にも、周囲にあるマントル物質よりも温度が低いという特徴を持つ。

この「プレートの残骸」は時間とともに密度が上昇し、上部マントルの下にある下部マントルのなかへ沈み込んでゆく。

そして低温の物質が下部マントルの底部に達した段階で、その下にある外核から熱を奪ってゆく。

これがコールドブルームの活動である。

【56】 その結果、核—マントル境界で徐々に冷やされた外核のなかでは、液体金属の流れに乱れが生じた。

対流パターンが変化することによって、それまで安定していた地球磁場の擾乱がおきはじめたのである。

まず、地磁気の逆転が頻繁に起こるようになった。

これが先のイラワラ事件である。

反転するには地場の強度が一時的にゼロになる。

そして地場強度の低下につれて、大量の銀河宇宙放射線が大気圏に侵入するようになる。

これが生物種の保存に大きなダメージを与えたのである。

その後、ホットブルームの上昇により発生した超巨大噴火によって、P/T境界の大量絶滅が起きた。

噴火とともに生物にとって有毒な火山ガスと粉塵が地表にもたらされたからである。

【57】 大量の火山ガスは地球の環境を急速に悪化させる。

エアロゾル（浮遊微粒子）と呼ばれる非常に細かい微粒子が大気中を漂い、酸性の雨となって地表に降り注ぐ。

エアロゾルは二酸化硫黄が水に溶けたものなので、硫酸の雨が降ったのである。

酸性水は川から海まで大量に流れ込み、水棲の生物に大きな打撃を与えた。

酸性雨のほかにも巨大噴火は生物に致命的な影響を与えた。

洪水玄武岩の活動が、地殻の底に大量の熱をもたらした。

この熱は地殻を大規模に溶かしていき、珪長質のマグマを作った。

マグマは火砕流の噴火を引き起こし、空中に大量の火山灰をまき散らした。

火山灰は非常に細かい粉塵（ダスト）となって地球全体を駆けめぐった。

何十年間も大気中を浮遊しつづけたダストは、太陽の日射をさえぎり、異常気象を引き起こした。

さらに成層圏に長期間滞留することによって、寒冷化を長引かせたのである。

【58】 ちなみに、現在でも大噴火に伴って異常気象が起きることがある。

たとえば、1982年のメキシコ・エルチチョン火山、また1991年のフィリピン・ピナトゥボ火山の噴火では、世界全体の平均気温が0.51～2度ほど下がった。

ところが、古生代末期の超巨大噴火はこれとは桁違いに大きな規模だった。

太陽光をさえぎったエアロゾルとダストが、地球の平均気温を数十度も下げたのである。

気温の急激な低下と大気と海洋の汚染が、動物と植物の両者に甚大なダメージを与えた。

これが、ホットブルームの引き起こした大量絶滅の姿である。

【59】 生態系は一時的な環境の劣化には絶えることが可能だが、長期にわたる継続には耐えられない。

ある時点で耐性の域値を超えてしまうと、種の絶滅が一気に進行する。

これが食物連鎖を通じて生態系全体の破滅に至ったのである。

ちなみに、生物にとっての環境悪化としては寒冷化がもっとも影響が大きかったが、その原因としては、地球外と地球内部の両方にある。

前者は銀河宇宙放射線の増加による寒冷化で、後者は超巨大噴火の引き起こした「ブルームの冬」による寒冷化である。

そして、ペルム紀にはG/L境界とP/T境界という独立した大きな変動が、さほど時を置かずに連続して起きたため、史上最大の大量絶滅となったのである。

■ ■ モンスーン気候の誕生と南極環流 ■ ■

【60】日本列島では四季がはっきりしており温帯の気候にある。気候帯で言えば亜熱帯から亜寒帯に属しているが、一方で日本の夏は蒸し暑くて大量の雨が降り、熱帯に近い気候にもなる。反対に冬は寒帯なみに寒く、日本海側には雪が大量に降る地域も多い。寒暖と乾湿の差が激しい日本列島の気候は東アジアに特有のものであり、地球上の海陸の配置によって作られたものである。ここでは、大規模な地殻変動と気候の関係を見ていこう。

【61】具体的には、太平洋、インド洋、ユーラシア大陸という基本的な海陸の配置が基盤になり、その上に生じる海流と大気の動きが、日本列島の気候を決定している。そして日本を含めてアジア大陸の気候は、「モンスーン」と呼ばれる気候システムに支配されている。モンスーンとはアラビア語に由来し、「季節風」という意味である。すなわち、夏と冬、もしくは季節によって風向きが反対に変わる風を表した言葉であった。15世紀以前のアラビア商人はこの季節風について知り尽くしており、航海に利用していた。中東のアラビア海では、冬には北東から、夏には南西から季節風が吹くことが知られていたのだ。この季節風はアラビア海だけでなく、インド洋からアフリカ東部を通してインドまでの広い地域に吹いていた。現在ではこの季節風は「インドモンスーン」と呼ばれている。

アジア大陸に特徴的なモンスーン気候

【62】モンスーンは大きく分類して、「インドモンスーン」「アジアモンスーン」「北アフリカモンスーン」と呼ばれる三つがある。日本列島のある東アジアと中国からベトナムにかけての東南アジアは、アジアモンスーンの領域である。また、アフリカ中央部のサハラ砂漠から西アフリカは、北アフリカモンスーンの領域である。アジアモンスーン地域では季節ごとに風向きが変わり、雨季と乾季が置き換わる。西アジアから乾季がゆっくり南下し、それに伴って東南アジアの雨季が北東の方角へ北上してゆく。その結果、日本列島では6月と7月には梅雨前線が発達し大量の降雨をもたらすのである。そして、この前線が北上した後は高温多湿の夏がやってくる。これらの一連の活動を終わって8月が過ぎる頃には、別の動きが始まる。中国とロシアの国境まで移動していた梅雨前線は、今度は南下を開始する。そして10月に向けて、日本列島の上空に秋雨前線をもたらすのである。

【63】気候システムで見ると、アジア大陸はアジアモンスーンの影響を受ける「湿潤アジア」と、その影響の及ばない「乾燥アジア」に分けられる。乾燥アジアとは中央アジア、西アジアのように年間の降水量が500ミリメートルに満たない地域である。そのため東アジアのような稲作はできず、農業には感慨が必要である。アジアモンスーン地域に含まれる日本列島では、その気候を支配しているのは、太平洋とユーラシア大陸の上空での気圧配置である。気圧配置と海流が変動することにより、毎年の気候システムに影響が出る。具体的には、恵みの雨をもたらす一方で旱魃や洪水が時おり発生し、市民生活と農業に深刻な影響をもたらすことがある。

モンスーンのメカニズム

【64】そもそもモンスーンとは、固体地球、海洋、大気の三者が連動して広域の気候システムを形成したものである。モンスーンは夏と冬の二つの異なる時期に、大陸と海洋とで温度差が生じることによって発生する。

具体的に、インドモンスーンで説明する。

夏の時期にアジア大陸にある大気は温められて軽くなる。

その結果、大気は上空に集まり、高度 11 キロメートルより下にある対流圏の内部では、気圧の変化が生まれる。

すなわち、対流圏の下部では空気が薄くなって低気圧になり、その反対に上部では空気が濃くなり高気圧となる。

そして対流圏の最下部にあるアジア大陸の地上では、低気圧が発生するのである。

さて、アジア大陸の南部でインド大陸の北限を作っているヒマラヤ・チベットの山塊では、夏には露出した岩盤が日光により温められる。

ここは平均標高が 5000 メートルに達する世界屈指の高地だが、直接岩石が温められるために、同じ高度にある大気よりも高い温度になる。

その結果、ヒマラヤ・チベット山塊上には低気圧が形成されるのである。

次に、この時期のインド海洋上の様子を見てみよう。

赤道を越えて南半球のインド洋上では、亜熱帯に特有の高気圧が発達している。

この亜熱帯高気圧帯から、インド大陸に向けて大気が流れ込む。

【65】 これらをインド洋からチベット高原までの地球を輪切りにした断面図で見てみよう。

南半球のインド洋で発生した南東モンスーンは、赤道を越えて北半球に入ると向きを変えて南西モンスーンになる。

これがインド大陸を通過してヒマラヤ・チベットの山塊へ吹きこむ。

チベット高原にぶつかった大気は、南の斜面に沿って急上昇しはじめる。

この際、インド洋からやってきた湿った空気中に含まれる水蒸気が凝固し、斜面へ大量の雨を降らせる。

湿った空気から水蒸気が取り除かれると、残りの空気の温度が高くなる。

これは「凝結熱の放出」という物理現象だが、水蒸気が水へと変化するときには熱が発生するのである。

よって、ヒマラヤ山脈に湿った空気がぶつかって雨を降らせると、残りの空気は乾燥しているのみならず、高温になっているというわけである。

さて、こうした凝結熱の放出によって、ヒマラヤ・チベット山塊の上空はさらに高温になった。

そして乾燥した高温の大気が北斜面を駆け下りて、チベット高原の北へ吹き渡ってゆく。

その結果、中国の内陸部にあるタクラマカン砂漠のような巨大な砂漠が形成されたのである。

こうしたモンスーンによる気候システムが、中国からアラビア半島に至る乾燥した中央アジアと西アジアを作りだした。

【66】 冬のアジアモンスーンの挙動を見てみよう。

冬にはアジア大陸の上空にある大気は冷やされて、重くなって下降する。

その結果、夏に起きた現象とは反対に、対流圏の下部で高気圧を形成する。

これがシベリア平原上にできるシベリア高気圧である。

シベリア高気圧から発生した北西モンスーンによって、大気はゆっくりと南下する。

このような重く冷たい空気は、ヒマラヤ・チベット山塊に阻まれて、それより南には南下することができない。

その結果、高気圧は巨大なシベリア高気圧として発達してゆく。

一方、インド洋上では、赤道付近にできた低気圧帯（熱帯収束帯と言う）が、インドネシア付近まで南下してゆく。こうした洋上の低気圧帯に向かって、アジア大陸上にある高気圧から吹き出す風は、北東モンスーンと呼ばれる。

【67】 このようなアジアモンスーンができるためには、この地域の大陸と海洋の配置が大きく影響している。

すなわち、アジアの亜熱帯から温帯にかけて大陸が存在し、赤道域には海洋が分布していることがポイントである。

この結果、夏と冬とで大陸と海洋の温度差が非常に大きくなる。
まず夏には大陸が温められて、陸上に低気圧が形成される。
この低気圧に向かって、海上に発達した高圧帯から、湿った大気が陸地に吹き込む。
たとえば、日本列島には湿った暖かい南風が海上から流れこむのである。
その反対の冬では、大陸が放射熱によって冷やされて高気圧が形成される。
一方、赤道付近の海上では、陸上に比べると暖かいので低気圧が形成される。
その海に向かって陸地から大気が吹きこむ。
具体的に日本列島で見ると、冬には中国大陸から乾いた冷たい北風が流れこんでくるのである。
このように、モンスーンのメカニズムでは、夏と冬における大陸と海洋の温度差が最大の要因となっているのである。

貿易風と偏西風のシステム

【68】地球全体を循環する大気について見てみよう。
地球上では季節に関係なく一定方向に吹く風がある。
それが「貿易風」と「偏西風」と呼ばれる二つの風の流れである。
たとえば、北半球にあるインドやスリランカでは、地球の周りを東から西に向かって吹く貿易風がある。
地上ではなく上空で観測されるもので、対流圏の下層にあたる高度8～11 キロメートルで吹く東風である。
これは「偏東風」とも呼ばれる。
なお、貿易風と名づけられたのは、古代よりこの風を利用して商人たちが帆船で海を渡って貿易していたことに由来する。
これが赤道を対称として反対の南半球では、やはり東風である貿易風となり、同様に年中同じ方向に吹いている。
すなわち、偏東風には北半球で吹く「北東貿易風」と、南半球で吹く「南東貿易風」がある。

【69】季節に関係なく一定方向に吹く風は、これよりも緯度が高い地域にも存在する。
地球の周りを西から東へ向かって吹く偏西風である。
具体的には、北緯30度から50度くらいの緯度の上空では、一年にわたって西風が吹いている。
実際には、少しずつ蛇行しながら西から東へ地球を回るような絶えず吹いている。
ちなみに日本列島は偏西風の領域にある。
また、赤道を対称として反対の南半球では、やはり西風である偏西風となり、同様に年中同じ方向に吹いている。
偏西風は対流圏の上層にあたる高度12～16 キロメートルで吹いており、高くなるほど風が強くなる。
偏西風の別名はジェット気流であり、西から東へ向かう航空機はこのジェット気流に乗ることで所要時間と燃料を節約できるのだ。

【70】貿易風と偏西風は、いずれも地球の極地と赤道とのあいだの温度差と地球の自転という二つの要素によって発生する。
一方で、貿易風と偏西風では、温度差と自転が関与する影響は少し異なっている。
偏西風は南北の温度差が大きく、かつ自転の効果の大きい地域で生じる。
具体的には、北緯および南緯30度付近の中緯度地帯の上空に発達する。
これとは逆に、貿易風（偏東風）は、南北の温度差が小さく自転効果の大きい地域で発達する。
具体的には、赤道を挟んだ北緯および南緯5度付近の低緯度付近でよく見られる。
なお、北極や南極の極地の周辺にも、弱い偏東風が吹いている。

【71】このように年中同じ方向に吹く風がある一方、季節によって風向の異なる風がモンスーンなのである。
地域で見ると、貿易風と偏西風の吹く領域の周辺にある地域が「モンスーン地域」である。

アジアモンスーン地域では季節によって異なる風が吹く。
すなわち、冬では北東の風が吹き、夏には南西の風が吹く。
日本列島で言うと、夏には太平洋から南東の風が吹き、6月には「梅雨前線」が発達する。
また、冬にはシベリアから日本に向かって北西の季節風が吹いてくる。
このとき季節風は、日本海を南から北に移動する暖流である対馬海流から水蒸気を獲得する。
これが陸地に入って雪に変わるため、日本海側は豪雪になる。

モンスーンの変動

【72】毎年、ヒマラヤ山塊では夏に低気圧が生じ、冬には高気圧が生じる。
この切り替えがアジアモンスーンの風向きを変えるスイッチの働きを担っている。
すなわち、インド・ヒマラヤ地域に見られる夏の南西モンスーンと冬の北東モンスーンの切り替えは、ヒマラヤ山塊の気圧の逆転時期が左右している。
なお、モンスーンの切り替わりの時期は、年によって変動することがある。
たとえば、ヒマラヤ・チベットの山塊に降る雪の量が、次のモンスーンの時期をずらすことがある。
一般に、冬に雪氷に厚く覆われているヒマラヤ・チベットの山塊は太陽光を反射する。
しかし年によって、チベット山塊では冬に極端に冷却が進むことがある。
厳冬期にヒマラヤやチベットでの降雪量が多い年には、雪氷がなかなか溶けずに遅くまで残ることがある。
こうなるとチベット高原が熱源となる時期が遅くなる。
その結果、夏の南西モンスーンが始まる時期も遅れ、モンスーンによる周辺地域の降雨量が減少するということが起きる。
これがモンスーンの切り替わりの時期を変動させる主な原因となる。

ヒマラヤ山脈の上昇時期とモンスーン気候の誕生

【73】地球の歴史のなかで、モンスーン気候はいつ誕生したのであろうか。
これはヒマラヤ山脈の上昇時期と密接に関わっている。
インド大陸はプレート運動によって、現在なお北北東に向かって移動している。
すなわち、毎年5センチメートルという速さでアジア大陸に衝突している。
このような運動は過去5500万年にわたって続いており、インドプレートの北端はチベット高原の中央まで到達している。
そしてヒマラヤ山脈が上昇を続けた結果、アジア大陸の内部では変形と破壊が現在でも続き、直下型地震の原因ともなっている。
ヒマラヤ山脈は大陸の衝突が生みだした世界最大の特異な「壁」である。
こうした地形の特異点によって、アジアモンスーンが誕生した。
これは世界を見回してもアジアだけに特徴的な現象であり、同じような大陸衝突の現場であるヨーロッパ・アルプスでは、モンスーン気候は誕生しなかった。
すなわち、アジアのような湿気を帯びた季節風が吹くシステムが生まれなかったのである。

【74】ヒマラヤ山脈の上昇とモンスーン気候の関係を考える上では、モンスーンという特殊なシステムを生み出すほどヒマラヤ・チベット山塊が高くなった時期を特定する必要がある。
さまざまな証拠から、700万年前までには現在と同じ規模のアジアモンスーンが確立していたことがわかっている。
そしてヒマラヤでは1000万年ほど前に急激な上昇が起こり、800万年ほど前には現在の高度近くまで達していた。
さらに、モンスーン気候が機能するためには、どのくらいの山の高さが必要かも重要なテーマである。
たとえば、ヒマラヤ山脈が現在の6割の高さに達したときにモンスーンが始まるという数値シミュレーションがある。

現在のヒマラヤ山脈の標高は約 9000 メートルあるので、6割の 5400 メートルに達したときからモンスーンが始まったと考えることができる。
そして 1000 万年前頃にはチベット高原の平均高度が現在の 6割程度に達していたという研究結果がある。

【75】ヒマラヤ山脈とチベット高原の誕生は、大気循環のみならず地球規模の「気候変遷史」という観点からも重要である。

新生代を通じて地球規模の寒冷化が進んだという事実がある。
これにもヒマラヤ・チベット山塊の上昇が関与したと考えられている。
たとえば、山塊が上昇すると、その周辺にある岩石の風化と堆積作用に大きな影響を与える。
山塊の上昇に伴ってモンスーンの活動が強まり、平均的な降水量が増える。
これによって地上に大量に存在する炭酸塩岩の化学的風化が促進される。
その結果、大気中に含まれる二酸化炭素が減少し、大気の温室効果が弱まる。
こうした現象が長く続くと、地球規模の寒冷化が進行すると考えられる。

南極環流と気候変動

【76】新生代の大陸と海流の変化に関して、もうひとつ重要な事実がある。
それはプレート運動によって南極大陸が完全に孤立し、その周囲に南極を周回する海流が誕生したことである。
すなわち「南極環流」と呼ばれる閉じた海流（したがって環流と呼ばれる）ができたのだ。
約 4000 万年前、オーストラリア大陸が南極大陸から分離して北上を開始した。
その後、3400 万年ほど前に、南米大陸と南極大陸が分離した。
プレート運動によって南米大陸の先端が引き伸ばされ、最後に南極大陸とかがろうじてつながっていた陸橋がちぎれたのである。

【77】南極大陸が完全に孤立するようになると、大陸の周囲を閉じた海流（南極環流）が取り囲む状況が生まれた。
その結果、南極大陸は極地の気候に閉じこめられ、降雨はすべて氷として固着されることになった。
すなわち、南極大陸は厚い氷床に覆われた氷河大陸に激変してしまった。
この氷の厚さは最大で 4000 メートルに達する。
南極環流の形成によって、南極大陸の周辺の海の温度は低下した。
具体的には、外側にある海洋と比べて 10 度もの温度差を持つ水温の壁が生じたのである。
その結果、生物界にも大きな影響をもたらし、南極周辺の海中にだけ独自の生態系が発達するようになった。

【78】新生代の気候変遷を見ると、新第三紀から第四紀にかけて寒冷な氷河時代へ突入していったことが知られている。
一方、新生代を通じて確認される寒冷化をもたらした「メカニズム」の詳細は、まだ解明されていない。
このように、地球表層の大地形の変化と大気・海洋システムとのあいだのリンケージ（連環）は地球科学で第一級の研究課題であり、現在でも進行中である。

■ ■ 第四紀の氷期と海流の大循環 ■ ■

【79】新生代は 6500 万年前から現在まで続く時代であり、大陸と海洋の地理の変化によって地域的に著しい環境変動が起きた。
新生代は温暖な中生代に繁栄した恐竜などに変わり哺乳類が繁栄した時代であり、後半には人類が誕生した。

新生代の気候は、その初期は比較的温和だったが、大陸配置が現在の状態へ近づくとつれてさまざまな変動が生じてきた。

たとえば、海洋と大気をめぐる大循環のシステムが変化した。

その結果、気候が不安定になるとともに、温暖な中生代にはなかったような気温の低下がしばしば発生した。

これは氷期と呼ばれるが、第四紀には氷期と間氷期が繰り返し現れた。

【80】新生代に入って北上を続けたインド大陸は 4000 万年ほど前にアジア大陸と衝突を開始した。

その結果、世界の屋根として知られるヒマラヤ山脈が形成され、それに伴ってアジアモンスーン気候が始まった。

こうした変化はアジア以外の大陸にも影響を及ぼした。

たとえば、アフリカ大陸にはヒマラヤ山脈の北側で発生した乾燥した大気がやってくるようになった。

そのためアフリカ中央部で広大な地域を占めていた熱帯雨林帯が消滅し、乾燥した草原、いわゆるサバンナへと変化した。

さらに他の地域でも、大陸と海洋の配置の変化は降水量の現象をもたらした。

大陸内部で乾燥化が進行した結果、乾燥した草原が各地へ広がっていった。

こうした草原では乾燥に比較的強いイネ科の植物が繁茂し、これを食料とする哺乳類が増えていった。

さらに、こうした草食動物を捕食する肉食動物が出現し、生物界が多様になっていった。

このように、新生代の環境変動は地球上の生物に強い刺激を与え、進化を促す原動力となった。

第四紀の氷河時代

【81】今から 259 万年前から始まる第四紀の地球上では、氷河が特異的に発達する時期がいくつかあった。

大陸を広く覆うような氷河を「氷床」と言うが、この氷床が広く発達する寒冷な「氷期」が出現したのである。

また、氷期と氷期のあいだには比較的温暖な時期が続き、氷期の区切りとなった。

これは「間氷期」と呼ばれる時期であり、第四紀に繰り返し訪れた。

ちなみに、現在、は約 1 万 8000 年前まで続いていた最後の氷河が終了した間氷期にあたる。

氷期には大陸の上に厚い氷床が発達する。

氷河の白い表面は太陽からやってくる熱エネルギーを反射するため、氷河の面積が増えると気温が低下する。

氷期には地球上の水分が氷河として蓄積されるため、海水面も低下する。

そのため河川はより多くの山地を削り、海岸近くには広い平野が形成される。

その反対に、間氷期には氷河が溶けるため、海水面が上昇する。

海岸近くの平野は水没し、高い山は数多くの島として誕生する。

このように海水面の変動は海岸地形を変化させ、陸地を分断する海峡や水道の配置が変わってゆく。海陸の地理の変化は景観を変えるだけでなく、植生の分布や動物の移動に影響を及ぼしてゆく。

【82】氷期と間氷期の違いは、地球上の水分の蓄積方法の差異として現れる。

空から降ってきた雨や雪は、氷期には氷床に蓄えられて大陸に長くとどまる。

地球全体を循環する水の多くが大陸上に蓄積されるため、海の水の総量が減る。

この結果、海面の低下という現象が起きる。

これは海が沖合に退くため「海退」と呼ばれる。

一方、温暖な間氷期には、雨や雪として降った水分は陸上にとどまることなく、河川を通じて海へと戻っていく。

温暖な気候によって海の水は蒸発し、大気中に水蒸気として供給される。

これが再び降雨や降雪として陸上に降り注ぎ、循環を繰り返すのである。
氷期に起きた海退の例として、その最盛期に 200 メートルも海面が低下したことが知られている。
これに伴い陸続きの場所が増加し、哺乳類などの動物の移動を促した。

氷期と間氷期

【83】地球の歴史を概観すると、陸上に氷河がある「氷河時代」と、全く存在しない「無氷河時代」に大きく分けられる。

これは地球表面の温度状態を反映したものであるが、現在は南極などに氷河があるので氷河時代に区分される。

恐竜が繁栄した白亜紀の地球は無氷河状態だった。

また、氷河時代には、現在のように極地方にのみ氷河がある状態と、地球全部が凍ってしまう「全球凍結」状態がある。

無氷河状態、部分氷河状態、全球凍結状態ともに安定な状態である。

地球上に液体の水が存在するようになってから 40 億年間の地球環境は、上記の三つの状態が交互に起きてきたのである。

【84】ちなみに、すでに述べたように、新生代におけるプレート運動の進行により南極大陸が他の大陸から孤立し、南極大陸の周りを循環する南極環流が誕生した。

これによって極地の上にある低温状態の大気は他の地域との交換が大きく制限され、次第に南極大陸が寒冷化していったのである。

その結果、地球上に氷河が生まれ、氷河時代と呼ばれる時代に突入した。

氷河時代のなかでも気温が比較的高い時期と低い時期の差がかなりある。

すなわち、寒冷な氷期と温暖な間氷期が明瞭に分かれて繰り返していたのである。

【85】地層に残された温度に関する情報を解析すると、一番最後の氷期は約 1 万年前より以前に終わり、現在は間氷期にある。

そして最終氷期以後に始まった温暖化によって地球上の各所にある氷河が縮小し、海水準が上昇したのである。

約 6000 年前に起きたこの海進は「縄文海進」と呼ばれている。

この 1 万年前は地質時代では重要な区切りとなっている。

第四紀のなかで末尾の時代区分である「完新世」と、その一つ前の「更新世」の境界にあたるからである。

また、最終氷期が終了し、間氷期が始まる 1 万年前は、旧石器時代とそれ以後の新石器時代および縄文時代の教会にも対応する。

新石器時代は 1 万数千年ほど前に始まり、縄文時代を経て現在の文明に到達した。

人類による知的な達成は、最終氷期以後に地球環境が温暖になったことと密接に関係しているのである。

ミランコビッチ・サイクル

【86】氷期と間氷期はある期間を置いて繰り返してきた。

第四紀の氷河時代には、ギュンツ、ミンデル、リス、ウルムと呼ばれる四つの氷期があった。

こうした気候変動には周期的な変動が認められ、地球科学的な意味を持つ。

具体的には、2万 3000 年（もしくは 2万 6000 年）、4万 1000 年、10 万年という三つの周期がある。

最初の 2万 3000 年の周期は地球の歳差運動によって生じる。

なお、歳差運動とは、地球の自転軸がゆっくりとぐらつくことを言う。

たとえば、コマを回したときに、軸を傾けながら頭を回すことがあるが、それと同じ動きを地軸も何万年という周期で行うのである。

また、次の4万 1000 年の周期は、地軸の傾き角の変動が生みだしたものである。最後の 10 万年の周期は、地球公転軌道の離心率の変化に対応する。なお、離心率とは惑星が回る軌道の形がどれくらい円からずれて細長いかを表す数値である。さて、こうした三つの異なる周期変動によって、地上に降り注ぐ日射量が周期的に変化する。そして日射量の極小期が氷期になり、極大期が間氷期になる。

【87】これは氷期と間氷期の天文学的な起源を明らかにしたもので、旧ユーゴスラビア（現セルビア）の地球物理学者のミルティン・ミランコビッチ（1879～1958）が 1940 年代に提唱した説である。

また、三つの周期はミランコビッチ・サイクルと呼ばれている。

過去 40 万年間の地球と太陽の距離と平均気温の変化とを検証すると、両者に関係があることがわかる。

すなわち地球と太陽の距離が大きいときには、地上に届く太陽エネルギーが減少するため、平均気温が低下する。

反対に距離が小さいときには太陽エネルギーが増加するため、平均気温が上昇する。

こうした変動によって氷期と間氷期の繰り返しが生じたのである。

また、離心率が大きい間氷期には海面の上昇が起きるので、特徴的な海進堆積物が地層として残される。

なお、2007 年、南極大陸に到達する氷床の上でボーリング調査を行い、氷のコアを採取するプロジェクトが行われた。

3000 メートルを超えるコアに過去の氷期と間氷期の繰り返しが記録されていた。

その結果、過去 74 万年間に 8 回の氷期、間氷期の繰り返しが確認された。

こうして過去 100 万年ほど前まで寒暖の変動が復元されるようになった。

海流の大循環

【88】地球の気温は海流と密接に関係している。

海水の流れのなかで、表層をほぼ一定の速度で進む規模の大きいものを「海流」と言う。

海流は温度によって区別され、周囲より高温のものを「暖流」、反対に低温の場合を「寒流」と呼ぶ。

日本列島の周辺では暖流の黒潮と寒流の親潮がよく知られている。

こうした呼び方はいずれも相対的なものである。

低気圧や高気圧などと同じく、基準の値があってそれよりも高低かどうかではなく、周囲と比べて暖流もしくは寒流であると定義される現象である。

こうした海流は地球上で熱が移動するときに重要な働きをしている。

具体的には、温度の高い低緯度から温度に低い高緯度へ向けて大量の熱を輸送する。

【89】地球は絶えず太陽から放射熱を受けているが、赤道地方と極地方に注がれる熱量には大きな差がある。

その違いを平準にするように大気と海流の流れが生まれる。

このとき、水蒸気と水が交互に変化する際に発生する「潜熱」も作用する。

すなわち、水蒸気が水になる際に必要となる「凝固熱」と、水が水蒸気になる際に必要となる「蒸発熱」（気化熱）の二つである。

こうした流れにより暖かい赤道付近から冷たい極付近へ熱が運搬される。

さらに、海水に溶けている塩分も関係する。

安定した気候をつくる深層水

【90】さらに、海水に溶けている塩分も関係する。

たとえば、海水を 1 キログラムほど鍋に入れて、煮詰めると、35 グラムの塩分が採れる。

その中身は、8割ほどが塩化ナトリウム（食塩と同じもの）で、残りが塩化マグネシウムや硫酸マグネシウム（にがりの成分）等である。

この塩分は、地球上のどの海水から取ってもほとんど同じ組成を示すので、海の水は長い期間によくかき混ぜられていることがわかる。

北極など極寒の地方では海の水が凍る。

このとき、氷のなかに塩分は入らないので、氷が大量にできると残りの海水中の塩分が濃くなってゆく。

塩分が増加した水は密度が大きく重いので、海の底へと沈んでいく。

沈んだ海水はゆっくりと海底を横方向へと移動しはじめる。

こうして深い海の中では海水の大きな流れが始まり、深層水の循環が始まる。

実は、海水面から深度が数千～1万メートルもの深海に、非常に遅い海水の流れがあることが判明している。

こうした深層水の流れは海洋の地域ごとに決まった流向を示し、地球上のすべての海洋を一周する巨大な循環系を持っていたのである。

【91】深層水は北大西洋で作られ、その循環が気候の安定化に重要な役割を果たしていることがわかってきた。

北大西洋は気温が低いため、ここで冷やされた水は、いったん海底に沈み込む。

この深層水は南大西洋からアフリカの南を抜けて太平洋までやってくる。

その後、北太平洋ではほどよく濃度が混ざり、ゆっくりと上昇するのである。

次に、海水面の近くに上がってきた水は、赤道付近を西へと移動する。

今度はアフリカ南のやや浅い水域を抜けて、再び北大西洋へと戻ってくる。

これが全海洋を一周する大循環の姿である。

これはアメリカの地球化学者ウォレス・ブロッカー（1931～）が明らかにしたもので、その形態から「海のベルトコンベア」とも呼ばれている。

この深層水の大循環は2000年ほどかけて起きていることが明らかとなった。

表層の海流

【92】このような深層水の大循環とは別に、海の表面近くでは海流が動いている。

たとえば、日本列島の太平洋側を流れる黒潮は、北東に進んでから北太平洋海流に連なり、さらにカリフォルニア海流を経て北赤道海流へと変化する。

このように黒潮は、太平洋の北半分を時計回りに一周する巨大な海流の一部なのである。

また、こうした表層の海流は、深層の大循環と比べると、流れの速度がはるかに大きいという特徴を持つ。

海流は一秒間に数十センチメートルも進む速度をもつ。

かなり速い流れだが、なかでも黒潮は一秒間に2メートルも進む、世界でも最も速く進む海流の一つである。

こうして「海のベルトコンベア」による深層水循環が、表層の熱輸送を支配していることがわかってきた結果、気候の変動と海水の循環との関わりが注目されるようになった。

表層の海流は熱の移動に際して、大気の流れに勝るとも劣らない重要な機能を果たしていたのである。

たとえば、海に近い土地では冬に暖かく夏が涼しいのは、表層海流によって運ばれる水の保温効果による。

表層海流の動きは、上空を流れる風によって引き起こされる。

具体的には、日本列島の緯度では強い偏西風が吹いており、黒潮が北太平洋海流と合流して東に流れるのを助けている。

一方、カリフォルニア海流から北赤道海流へと変わった流れは、今度は貿易風の助けを借りて西へ流れる。

なお、以上は北半球の海流の動きであるが、南半球ではちょうど対称になるように反時計回りに一

周する巨大な海流ができています。

氷床の融解が起こす気候変動

【93】過去の気候はボーリングコアの試料から知ることができる。グリーンランドの氷床コアの分析から、過去の気温と大気の組成がわかってきた。氷を作っている水素の同位体や酸素の同位体から、過去の気温を知ることができる。また、氷のなかに閉じ込められた空気の泡には、二酸化炭素をはじめとする当時の大気組成が残されている。こうして何千メートルもの氷床コアを、センチメートル単位で分析することによって、地質時代の気温とその変動を読みとることに成功した。その結果、氷期に見られる激しい気候変動が判明し、特に「ヤンガードライアス期」と呼ばれる1万1000年ほど前の寒冷期の様子が明らかになった。この原因は、当時の北米大陸上にあった氷床が溶けて海に融解水が流入したためと考えられる。この結果、北米大陸周辺にあった深層水の循環が停止し、北米とヨーロッパで激しい寒冷化を起こしたと推定されている。具体的には、この頃には平均気温が現在より10度ほど一気に低下したことが判明した。そのため高緯度地域だけでなく低緯度地域まで寒冷化が及んだと考えられている。

【94】氷床が溶けて大量の融解水が発生すると顕著な気候変動を起こすことがある。ヤンガードライアス期の他にも融海水の流入があり、一時的に氷期に逆戻りしたような気候になったことがある。氷期には数十年という短い単位で、平均気温が5度ほど低下する事件が何回も起きていた。このような気候変動の原因も深層水の循環が乱れることによって生じたものと考えられている。ヤンガードライアス期以降になると、氷床コアの記録は安定した気温を示している。特に、1万年前以降の完新世には、深層水の循環が安定して機能していた。一方、20世紀後半に見られる温暖化が、氷期にあったような深層水の沈み込みの乱れを発生し気候変動を起こすかどうかは、まだよくわかっていない。

現代の地球環境の変動

【95】過去100万年間の地球規模の環境変動を見ると、間氷期はどんなに長くても2万年くらいしか続かない。われわれが現在過ごしている間氷期がすでに1万年を過ぎていることを考えると、温暖な時間は残る1万年程度という計算になるのである。現在は再び緩やかに氷期に向かいつつある時期にある。すなわち、長期的には寒冷化している途上にあるのだ。今、世間では地球温暖化が問題にされている。しかし、世界経済まで巻きこんで話題になっている地球温暖化問題とは、地球が寒くなりつつある最中の局所的な温暖化なのである。実は、人類史的に考えると、温暖化よりも寒冷化のほうが、生物には打撃が大きい。もし気温が下がりつつ北半球の多くが氷河に覆われるようになると、穀物生産が激減して食糧危機が到来する恐れがあるからだ。さらに、大気中の二酸化炭素が減ると、今度は光合成が抑えられ、植物の生産量そのものが減少するといった現象も起こりうる。したがって、地球上で発生するマクロな現象に対しては、数十年ではなく数万年という時間軸で捉えなおさなければならない。

【96】地球上では今後いつから寒冷化が始まるかについて考えてみよう。ここでの知見は、地質学者（たとえば、丸山茂徳）の解析した結果に基づいている。

地球の歴史の今から 6000 万年前から現在までの気温の変化を見てみよう。非常に温暖だった白亜紀の終わりから、新生代に入ってだんだんと寒くなったことがわかる。そして 100 万年ほど前から南極と北極に巨大な氷河が発達しはじめた。その後、ギュンツ、ミンデル、リス、ウルムという規模の大きな 4 回の氷期を経験した。最後のウルム氷期が終わった後、約 1 万年前に温暖化が始まったのである。完新世と呼ばれる 1 万年前から間氷期に入ったが、いまだに地球の両極には氷床が残っている。よって、現在の地球は間氷期にはあるが、相変わらず氷河時代なのである。1 万年前以後の地球は次第に暖かくなり、6000 年前にピークに達した。これが縄文海進の時期で、このあいだに気温は 7 度ほど単調に上昇してきた。その後は現在まで数回の上下変動を繰り返しながら推進してきた。このあいだに温度の変化は 4 度ほどあり、文明が誕生する 5000 年前以前にもまさる大きな変動を人類は経験してきたのである。

太陽の活動が温暖化に影響する

【97】太陽の黒点をくわしく観測した結果、太陽の活動が温暖化に影響していることが明らかとなった。

太陽の表面には黒点があり、周期的に数が増えたり減ったりしている。黒点が多く存在するときは、太陽の表面で爆発が次々に発生し、膨大なエネルギーが地球まで降り注いでいることを意味する。

この結果、地球はより多くのエネルギーを受け取るので温暖化が起きる。

過去 400 年間の太陽黒点数と平均気温を比較してみると、大局的には太陽の活動が活発化するにつれて地球の平均気温が上昇したことがわかる。

【98】西暦 1960 年から 2000 年までの黒点の相対的な量と、平均気温を比較してみると、地球の気温は 11 年の周期でゆっくりと上がって急に下がるという現象が見られる。

太陽黒点の増減は、太陽表面での活動の強弱を表している。

太陽の黒点数が極大になる時期には、太陽からの放射エネルギー量が 0.1 パーセント増える。たとえば、黒点が増えるときにはコロナが大きくなり、太陽から吹き出すプラズマ流である太陽風も強くなる。

さらに表面から噴出するフレアも増加する。

こうした規則的な変化は太陽黒点の変化ときれいな相関があり、太陽活動の 11 年周期とよく合うのである。

【99】地球の気温は過去 30 年のあいだに 3 度ほど上昇してきたが、温暖化の原因は太陽の周期活動にあることが判明した。

逆に、過去には太陽活動の低下によって寒冷化が起きたことがある。

1645 年から 1715 年までの 70 年間は、地球の平均気温が 0.2 度も下がったことが記録されている。

当時のロンドンでは冬にテムズ川が凍りつき、氷の上を人が歩いて渡った。

ヨーロッパ全土で食糧生産が減少し、飢饉が発生したのである。

また、アルプスでは氷河が麓まで拡大して村落をすっぽり覆ってしまった。

こうした寒冷期は、この発見者の名前をとり「マウンダー極小期」と呼ばれており、太陽活動の低下が引き起こしたものである。

今後も太陽黒点の変化から、マウンダー極小期のように太陽活動が低下する時期が出現する時期が出現する可能性がある。

この予測はとりもなおさず、数十年にわたる気候の寒冷化をもたらすのだ。

【100】近年、銀河系から飛んで来る宇宙線が地球の寒冷化をもたらす説が浮上した。

1997 年にデンマークの宇宙物理学者ヘンリク・スベンスマルク（1958～）は、地球上の雲の成

因を宇宙線に求める説を発表した。

彼は、銀河系のはるか彼方から絶えず降り注いでいる宇宙線が雲を作るプロセスを提唱した。

宇宙線が、大気中の飽和水蒸気にある刺激を与え、水蒸気が大気中の小さなチリを核にして水の微粒子、すなわち雲になるという。

先に述べた太陽黒点の変化は、太陽の磁場が弱くなることを意味する。

すると、太陽系に侵入できなかった高いエネルギーを持つ宇宙線が地球まで到達し、より多くの雲を発生させるようになる。

そして、いったん対流圏内に雲が増えると、太陽光を反射するため地球の受け取るエネルギーが少なくなる。

これまで過去 100 年以上、温暖化の傾向が続いていたが、これがいつ寒冷化に反転しても不思議ではないのである。

また、火山が大量にマグマを噴出して地球の平均気温を下げるという現象も知られている。

大量の火山灰が対流圏から成層圏に入ると、エアロゾルなどの微粒子が数十年にわたって太陽から来る放射エネルギーを遮断する。

これは「ブルームの冬」と同じ原理であるが、地表の温度変化に大きな影響を与える要因となりうる。

2. 地球の気候はどう決まっているか

■■気候とは■■

【101】「気候」とは、ある程度の幅を持ちつつ、1 年を周期として最も高い確率で出現する大気の総合的状态を言い、通常は 30 年以上の観測値を平均（平年値）した気候項目、もしくはそのように見なせるもので表現される。

気候項目とは、気温、風（風速、風向）、降水、相対湿度、蒸発、雲量、日照、などである。

■■気候システム■■

気候の成り立ち

【102】大気に包まれた地球を太陽が照らしています。

地球の表層には海と陸があり、どちらにも雪や氷で覆われている部分があります。

大気には酸素や窒素のほか、二酸化炭素や水蒸気なども含まれています。

太陽エネルギーによって大気と海が循環し、各所で水、その他の物質のやりとりが行われています。そのやりとりの中では生物の存在も重要です。

地球の気候はこのような複雑な相互作用を含んだシステムであり、「気候システム」と呼ばれています。

特に、地球表面の7割を占める海洋は、大気との間で海面を通して熱や水蒸気などを盛んに交換しており、海面水温や海流の変動は気候に大きな影響を及ぼします。

【103】日々の天気に移り変わるように、気候も常に動いています。

平年値も、どの 30 年を取るかで変わります。

気候のふるまいは、数年程度から数万年といった、注目する時間スケールによって、さまざまな様相を示します。

「気候変動」というときは、どの時間スケールを問題にしているかがとても重要です。

気候を決める要素

【104】気候変動には、気候システム内部の作用によるものと、気候システム外部からの作用によるものがあります。

エルニーニョ現象は、内部要因による変動の代表的なものの一つです。

そこで変動を引き起こしているのは、海と大気の相互作用です。

気候システムを駆動する力は太陽エネルギーです。

地球の内部から地表面へ出てくる熱エネルギー（地熱）もありますが、その量は地球大気の上端に到達する太陽エネルギーの4000分の1にすぎず、また人間活動が出すエネルギーはそのさらに半分程度（太陽エネルギーの1万分の1）であり、ここでの議論の範囲では無視できる大きさです。

【105】太陽から地球が受け取るエネルギーは、長短の時間スケールで変動しています。

11年の周期で太陽自身の活動が変化するほか、数万年という時間スケールでは地球の公転軌道の変化（距離や地軸の傾きの変化）によって変動しています。

そのほか、火山の噴火、大気組成や土地表面の変化などによっても、地球が太陽放射エネルギーを吸収する割合が変わり、したがって受け取るエネルギーが変わります。

【106】大規模な火山噴火では、噴煙や火山ガスとして、成層圏に硫酸ガスなどのエアロゾル（液体や個体の微粒子）が放出されます。

エアロゾルは大気中に数年の間留まり、太陽光を反射して、地上の気温を下げる場合があります。

1991年のフィリピンのピナツボ火山噴火のときなどが良い例です。

森林火災や、工場の火力発電所などの人間活動によっても大気中のエアロゾルが増加することがあります。

【107】森林破壊などによる植生の変化は、水の循環や地球表面の日射の反射量に影響を及ぼします。

人間は、農業を発明して耕作地化を進めて以来、土地利用を通して地球の気候を改変してきたのです。

18世紀の工業化以降は、化石燃料を燃やすことが、他の要因を凌駕して気候の変化を引き起こしています。

大気中に二酸化炭素を放出することによって温室効果を強め、地上気温を上昇させているのです。

以上、【105】から述べたそれぞれの要素が地球の気候システムに出入りするエネルギーのバランスを変化させる影響力を持っていますので、その大きさを「放射強制力」といいます。

人間活動による大気中二酸化炭素の増加は、気候に対する人為的な強制力といえます。

地球の温度はどう決まっているか

【108】この気候システムにおいて、地球全体の温度はどのようにして決まっているのでしょうか。それは、太陽から受け取るエネルギーの収支によります。

エネルギーの収支とは、地球に太陽からどれだけのエネルギーがやってきて、そのうちのどれだけが宇宙空間へ反射され、差し引きどれだけを地球の気候システムが受け取っていて、そしてそこからどれだけのエネルギーを宇宙空間へ放出するかです。

【109】地球が宇宙空間へどれだけのエネルギーを放出するかは、地球の温度によって決まります。入射する太陽放射と、「反射＋気候システムからの放射」が釣り合うところで地球の温度が決まることとなります。

もしこれらが釣り合わないと、入超であれば温度が上昇していき、出超であれば温度が下がって行って、いずれは釣り合うこととなります。

【110】太陽から地球大気の上端に到達するエネルギーは、1平方メートルあたり約1370ワットです。

夜の部分や斜めにあたる部分を考慮して全地球で平均すると、この4分の1の340ワットとなります（以下では、全地球平均、1平方メートルあたりとする）。

地球に達した太陽エネルギーは、どのように巡っていくのでしょうか。

大気上端に達した太陽エネルギーの約30%の100ワット分が、宇宙空間に反射されています。この反射の約4分の3は、雲やエアロゾルによるもので、残りにあたる約4分の1が地球表面による反射です。

特に、雪、氷、砂漠といった地球表面の明るい部分で反射される割合が大きく、森林や海ではあまり反射されません。

植物は光合成を効率的に行うために、太陽エネルギーを反射せずに利用するように進化してきたわけです。

【111】宇宙空間へ反射されなかったエネルギーは、地球表面と大気に吸収されることとなります。この量は240ワットです。

ちなみにその3分の2が地球表面で、3分の1が大気で吸収されます。

ですから地球表面で吸収されるエネルギーは約160ワットとなります。

反射されるエネルギー（ここでは100ワット）と、もともと到達するエネルギー（ここでは340ワット）の比（反射率）を、「惑星アルベド（albedo）」といいます。

ここでは約30パーセントです。

惑星アルベドは、気候にとって重要な値です。

雲やエアロゾルがたくさんあると反射率が大きくなり、地球で吸収されるエネルギーが減るため、地球は冷えることとなります。

またその逆も真です。

過去十数年の衛星観測によると、この値に顕著な変化傾向はないと評価されています。

ただし、より長期にわたる信頼できる観測はないため、長期的に変わりつつあるのかわかりません。

【112】あらゆる物体（気体も含めて）は、常にその温度に応じたエネルギーを放射しています。高温のものほど多くのエネルギーを放射します。

太陽の表面温度は約6000℃であり、その温度に応じた光というエネルギーを放出しており、その一部が地球に届いているわけです。

地球は、宇宙空間からみると、340ワットのエネルギーを受けて、100ワットを反射し、240ワットをいったん吸収し、同量の240ワットをふたたび放射していることになる。

240ワットを放射する物体の温度は、マイナス18℃くらいでなければなりません。

これは、実際の地球表面よりずっと低温です（世界平均地上気温はおよそプラス15℃）。

実は、マイナス18℃となっているのは、地上約5キロメートルの大気なのです。

温室効果

【113】実際の地上気温がマイナス18℃より高い理由は、大気中に温室効果ガスが存在するためです。

大気中に最も多く含まれる窒素と酸素は、温室効果に寄与しません。

代表的な温室効果ガスは、水蒸気と二酸化炭素です。

そのほかに、メタン、一酸化二窒素、オゾン、ハロカーボン類（いわゆるフロンガスなど）も温室効果ガスです。

（福永注：太陽が放射する電磁波の紫外領域（0.4マイクロメートル以下）や赤外領域（0.8マイクロメートル以上）では、太陽の光があまり地表に届いていないことがわかっている。これは、これらの波長の太陽光が大気で吸収されていることを意味する。可視領域の波長帯は、そのほとん

どが地表に届いている。以上は多田隆治「気候変動を理学する」より引用。）

温室効果ガスは、赤外線を吸収しやすいが、可視光線は吸収しにくいという性質があります。太陽によって暖められた陸や海などの地表面からは赤外線が放射されますが、その多くが、これら温室効果ガスで吸収されます。

すると大気が暖まり、そこから赤外線が放射されます。

大気からは上下左右の全方向に赤外線が放射されますから、ほぼ半分は地表へ向けて放射されることとなります。

このため、太陽から直接受け取るエネルギー（反射される残り）よりも多くのエネルギーを地球表面は受け取ることになり、温室効果ガスがない場合よりも地球表面は温度が上がります。

これが温室効果です。

【114】人間による気候システムへの介入以前から、自然界には温室効果ガスが存在していました。また、地球の長い歴史の中で、大気中の二酸化炭素の濃度は大きく変化してきました。

人間は、農耕や牧畜のために森林を伐採し、工業化以降は化石燃料の燃焼によって、大気中に温室効果ガスを排出してきました。

そのことにより、従来からある温室効果が強化され、地球の気候が温暖かしています。

工業化前の大気中二酸化炭素濃度は約 280ppm(ppm は 100 万分の 1 を表す)とされています。

2013 年には、396ppm となっており、約 40%増加しました。

この増加は化石燃料からの排出と正味の土地利用変化による二酸化炭素の排出によるものです。

ここで、大気中に排出された二酸化炭素のすべてが大気中に残留しているわけではありません。

排出されたうちの約 30%が海洋に取り込まれ、約 30%が自然の陸域生態系に蓄積しており、残りが大気中に蓄積することで、温室効果を強めているのです。

【115】地球観測衛星による最近の観測では、地球が吸収しているエネルギーが 1 m^2 あたり 240 ワットなのに対し、地球が宇宙へ向けて放出しているエネルギーは 239 ワットとなっています。差し引き 1 ワットの入超です。

つまり、地球全体の熱収支は、現在、平衡状態にはなく、地球は暖まりつつあるのです。

その主要因は、大気中の二酸化炭素濃度が高くなり、温室効果を強めていることです。

温室効果ガスが増えることは、宇宙へのエネルギー放出を妨げる効果があると言ってもいいでしょう。

■■大気の大循環■■

放射の緯度分布

【116】地球が球形をしているため、地球に入ってくる単位面積あたりの日射量は低緯度ほど多く、高緯度ほど少ないことがわかります。

南北 36 度付近を境にして、それより低緯度では、地球が受け取る日射量のほうが出ていく地球放射量よりも多く、高緯度では、その逆になっています。

このことは、放射平衡は地球全体で成り立っており、緯度帯ごとには成り立っていないことを意味しています。

もし、局所的な放射平衡が緯度帯ごとに成り立っているとすると、南北の温度差は 100°C くらいになってしまいますが、現実には、南北の温度差は平均的には 50°C 程度に維持されています。

地球上では、大気や海洋の大循環の運動が起こり、熱が低緯度から高緯度に輸送されています。

ここでは大気の大循環について述べます。

低緯度における熱輸送

【117】赤道付近では、日射加熱によって暖められた空気が上昇し、地上付近では北東貿易風と南東貿易風が収束します。

これはハドレー循環とよばれています。

赤道に沿ったこの収束帯は熱帯収束帯とよばれていて、ここでは積雲や積乱雲がたくさん発生し、雨が多く降ります。

熱帯収束帯で上昇した空気は、圏界面まで到達し、その後、南北に分かれて緯度 30 度付近で下降流となります。

熱帯収束帯上の上昇流域は赤道低圧帯とよばれ、その高緯度側にある下降流域は、亜熱帯高圧帯とよばれています。

亜熱帯高圧帯から赤道低圧帯に向かって吹き出した地上付近の風が、北東貿易風と南東貿易風になります。

貿易風が東風成分をもつのは、コリオリ力の影響を受けているためです。

熱帯収束帯は、年平均で見ると赤道のやや北側に見られますが、季節によって南北に移動します。北半球の夏に北上し、冬に南下します。

これは、地球の公転軌道に対して地軸が傾いているために、各緯度帯で受け取る日射量が季節変化するからです。

【118】緯度 60 度付近の高緯度低圧帯で上昇した空気は、圏海面まで到達し、その後、極域の極高圧部で下降流となります。

これは極循環とよばれていますが、寒い極域で下降して、相対的に暖かい高緯度で上昇するという循環によって、南北の熱輸送に貢献しています。

しかしながら緯度 30 度付近の中緯度付近の亜熱帯高圧帯と、緯度 60 度付近の高緯度低圧帯との間の循環であるフェレル循環は、ハドレー循環や極循環と逆向きの流れになっています。

いったい、中緯度から高緯度まで、どうやって熱が輸送されているのでしょうか？

中緯度における熱輸送

【119】中緯度では、西から東に吹く偏西風の流れの蛇行によって、熱を運んでいます。

中緯度の上空では、偏西風とよばれる強い西風が南北に蛇行しながら吹いており、谷の後面（西側）では寒気を北から南に運び、谷の前面（東側）では暖気を南から北へ運びます。

ここで、谷というのは偏西風が低緯度側に蛇行している部分を指します。

【120】偏西風の谷は、地上天気図では温帯低気圧として現われます。

北半球中緯度の温帯低気圧は、多くの場合、東～北東方向に進みます。

そして、その進行方向前面（東側）で暖気を北側に上昇させ、後面（西側）で寒気を南側に下降させます。

東西方向に平均すると、温帯低気圧の中心の北東側での上昇気流と、南西側での下降気流が残り、高緯度側（北側）で上昇し、低緯度側（南側）で下降するというフェレル循環が見えてきます。

フェレル循環は、東西平均をすることによって見えてきた循環で、実際には、フェレル循環によって熱が輸送されているわけではありません。

中緯度では、偏西風の波に対応する温帯低気圧が、南北の温度差を解消しています。

■■異常気象の発生■■

【121】気象とは、「時々刻々と変化する大気の現象」を意味する用語です。

「異常気象」とは、一般に、過去に経験した現象から大きく外れた現象で、人が一生の間にまれにしか経験しない現象のことを言います。

数時間程度の大雨や強風などの激しい気象や天気の異常から、数ヶ月も続く干ばつや極端な冷夏といった気候の異常も含まれます。

気候とは、長期にわたる気象の平均です。

異常気象は、まれとはいえ気候システムの正常なふるまいです。

異常気象の発生には、熱帯の海面水温の変動や、日本周辺の上空を年中吹いている偏西風の蛇行など、さまざまな要因が関わっています。

日本の異常気象

【122】2014年8月には、西日本を中心に記録的な多雨と日照不足となりました。この不順な天候をもたらした主な原因は、南から暖かく湿った空気が流入し続けたことです。太平洋高気圧が日本の南東海上で強く、日本付近では西への張り出しが弱く、湿った空気が日本へ入り込みやすい状態でした。また太平洋東部とインド洋東部では平年より海面水温が高く、対流活動が活発でした。この影響で、インドシナ半島から南シナ海、およびフィリピン付近では対流活動が不活発となり、海面気圧が平年より高くなりました。これが偏西風に影響し、日本の西側で偏西風が南に、東側では北に蛇行しました。このため、前線が日本の上空で停滞しやすくなり、不順な天候が持続しました。また、台風第11号と12号も影響しました。

【123】2013年の夏には、西日本で統計開始以来第1位の高温となるなど、日最高気温の記録更新もありました。7月以降、太平洋高気圧とチベット高気圧が強まったことによって、西日本を中心に全国で暑夏となりました。西に強く張り出した太平洋高気圧の周縁を吹く、暖かく湿った空気が日本海側に流れ込み、たびたび大雨となりました。太平洋高気圧とチベット高気圧がともに優勢となった要因は、海面水温がインドネシア・フィリピン周辺で高く、中・東部太平洋赤道域で低くなったことにより、アジアモンスーンの活動が広い範囲で非常に活発になったこととみられています。2014年の夏とは逆に、フィリピン付近で対流活動が活発で、太平洋高気圧は日本を広く覆っていました。

【124】2011年12月後半から2012年2月初めにかけての冬のことです。北日本から西日本にかけて低温となり、日本海側を中心に記録的な積雪となったところがありました。この年の冬は東アジアや中央アジアでも低温でした。この異常気象の要因は、シベリア高気圧の勢力が強く、冬型の気圧配置が強まったこと、また偏西風の蛇行にともなってしばしば北極から強い寒気が南下したことにあります。2014年2月の大雪も同様で、偏西風が大きく蛇行し、北極域の冷たい空気が日本付近まで下りてきたためです。

異常気象に関する変動現象

【125】日本の異常気象を発生させる要因としては、熱帯の海面水温、積雲対流活動、太平洋高気圧、上空の偏西風、北極からの寒気の流入、などの変動がよく挙げられています。しかし、これらはいずれも、異常気象のときだけに現れるのではなく、常に日本の気象を形作っているプレイヤー達です。エルニーニョ現象、ブロッキング、北極振動は異常気象に関する変動現象です。

エルニーニョ現象

【126】熱帯海面水温の最大の変動は、エルニーニョ現象（正確には「エルニーニョ・南方振動」）です。

エルニーニョ現象とは、太平洋赤道域の中央部（日付変更線付近）から南米のペルー沿岸にかけての広い海域で、海面水温が平年に比べて高くなり、その状態が半年から一年半程度続く現象です。ラニーニャ現象はその逆の現象をいいます。

1997年から1998年にかけての冬に起こったエルニーニョ現象時には、熱帯東部太平洋の海面水温が平年に比べて3℃以上も高くなりました。

これらは大気の変動とも密接に関連していて、エルニーニョ（ラニーニャ）現象時には、太平洋赤道域の海面付近の東風である貿易風は平年に比べて弱く（強く）なります。

また、平常時にはインドネシア近海で活発な対流活動が、エルニーニョ現象時には太平洋赤道域の中部へ移動し、逆にラニーニャ現象時にはインドネシア近海での対流活動がいっそう活発になります。

エルニーニョ（ラニーニャ）現象時には、インドネシア付近の海面気圧は高く（低く）、東太平洋では低く（高く）なっており、この気圧分布を南方振動といいます。

以上の大気と海洋の変動を合わせてエルニーニョ・南方振動と呼びます。

ただし振動とはいっても厳密な周期性はなく、2年から7年といった幅広い間隔で起こっています。

【127】海面付近の東西風の強逆によって、熱帯太平洋の海面水位も変動します。

1997年～1998年に起こったエルニーニョ現象時には、東側の海面水位が平年より20～30センチメートルも高く、逆に西側では10センチメートル以上低くなりました。

エルニーニョ現象が発生すると、熱帯大気の東西循環が弱まるだけでなく、降水の位置が変わるため、それに対応して中高緯度でも大気の流れパターンに特徴的な変化が起こります。

日本の夏の天候は、北日本、東日本、および西日本で気温が低く、北日本太平洋側と西日本日本海で降水量が多くなる傾向があります。

冬は、東日本、西日本、および沖縄・奄美で気温が高く、北日本と東日本日本海側で降水量が少ない傾向があります。

ブロッキング

【128】雲ができて雨や雪が降るといった気象現象が起こるのは、地面から上空十数キロメートルまでの対流圏です。

対流圏中の気温は、太陽エネルギーが頭上から届く低緯度で暖かく、斜めから届く極側で冷たくなっています。

この南北方向の温度差により、地球スケールの大気の流れが駆動されています。

【129】この南北差に対応して、日本など中緯度の上空では、西風が吹いています。

この西風は一年中吹いているため、偏西風と呼びます。

偏西風は高度が上がるとともに強くなり、対流圏と成層圏の境目（対流圏界面。高度は高緯度で約8キロメートル、低緯度で約16キロメートル）付近で風速が最大となります。

特に冬季の日本の上空では風速が速く、毎秒100メートルにもなり、ジェット気流とも呼ばれます。

航空機で日本とアメリカの間の所要時間が往路と復路で1時間半ほど違うのは、このジェット気流のためです。

偏西風は、同じ季節、同じ月でも、時とともにゆらぐ性質があり、また南北に蛇行する性質があります。

偏西風が南北に蛇行することで、低緯度側の熱を極側へ運び、南北方向の温度差が大きくなりすぎないように調節されています。

【130】偏西風が南に蛇行しているところは周囲に比べて気圧が低く、低気圧になっており、また北に蛇行しているところは高気圧になっています。

それらが西から東へ流れています。

したがって、ある地点では、低気圧と高気圧が交互にやってくることになります。

ところが何らかの強制が働き、低気圧や高気圧が西から東へ流れていかなくなることがあります。これがブロッキングです。

そうすると、高気圧が居座った場所では毎日晴天が続いて高温現象が起きたり、低気圧が居座ったところで雨が降り続くといった異常気象が起こります。

【131】ブロッキングが起こりやすい場所は、北大西洋上と北太平洋上の2ヶ所にあります。

夏季に大西洋上でブロッキングが起こると、ヨーロッパに高気圧が居座り、晴天が続いて雨が降らなくなり、土壌も乾いて熱波をもたらします。

2003年のヨーロッパ熱波や、2010年のロシア熱波はブロッキングが関係していました。

また太平洋上のブロッキングは、アメリカ西岸に高気圧を、アメリカ東部に低気圧を持続させることとなります。

冬季だと、カリフォルニアを中心に高気圧が居座り、晴天が続いて雨が降らなくなって干ばつとなります。

このとき、アメリカ東部では大雪が降り続くこととなります。

2012年の1月から2月の日本付近の例ですが、このとき日本は顕著な低温となり、日本海側を中心に記録的な積雪となりました。

この期間は、シベリア高気圧の勢力が強く、冬型の気圧配置が強まったわけですが、特に1月下旬から2月初めにかけては、シベリア北東部でブロッキング高気圧が居座り、その南西側ではシベリアからの強い寒気が日本に流入しました。

北極振動

【132】冬の北からの寒気の流入に関係するのが、北極振動です。

これは北半球において最も顕著に現れる海面気圧の変動現象です。

南北半球の極域には低気圧がずっと存在し、その周りには相対的に気圧の高い部分が分布します。極を真上から見ると気圧の高いところがドーナツ状の分布をしていて、極周辺の低気圧域とそれを取り囲む高気圧域のコントラストが強くなったり弱くなったりして、振動しています。

それを極振動と言い、北半球では北極振動、南半球では南極振動と呼ばれます。

この北極振動の「プラス」のモードというのは気圧のコントラストが強い時期のことで、北の極域は低気圧がより強くなって、それより南の中緯度域は高気圧がより強くなっている状態です。

逆にそれらが弱くなるのが、極振動が「マイナス」モードの時期です。

【133】「プラス」のモードのときは、寒気が北極に蓄積されており、ヨーロッパからユーラシア大陸上、極東まで地上気温は高い状態となります。

このときは北日本を中心に暖冬となる傾向があることを示しています。

北極振動の位相が「マイナス」モードになると、日本など中緯度に、北極の寒気がしばしば南下して、寒冬になります。

日本は、エルニーニョ現象と北極振動の両方の影響を受けています。

エルニーニョ現象の影響を受ける北限に近く、北極振動の影響を受ける南限に近いのです。

【134】異常気象は、熱帯の海面水温や偏西風の蛇行などさまざまな要因が関わって、気候システムの自然なゆらぎとして起こるものです。

異常気象が起こるのは、気候システムにとっては正常なのです。

問題はその頻度です。

この自然なゆらぎに地球温暖化が重なって、異常気象の程度や頻度が変わってきています。

3. 地球の温暖化の進行を見る

■■温暖化が停滞から復活するか■■

中世気候異常期と小氷期

【135】ヨーロッパの中世にあたる10世紀から14世紀にかけてヨーロッパで温暖だった時期があり、中世温暖期と呼ばれていました。

西暦950年～1250年の300年間とすることもあります。

グリーンランドへの入植が行われるなど、ヨーロッパでは温暖だったようです。

しかし世界的に温暖だったかについては疑問が投げかけられ、ヨーロッパを中心とする地域的な現象だったと考えられるようになりました。

そのため、今では、中世気候異常期と呼ぶようになっています。

【136】小氷期も、やはりヨーロッパを中心として、14世紀半ばから19世紀半ばにかけての寒冷な期間を指します。

西暦1450～1850年の400年間とすることもあります。

イギリスのテムズ川やオランダの河川が凍結した様子が絵画に残っています。

スイス・アルプスの氷河は低地まで拡大していました。

小氷期は北アメリカでも見られ、日本でも寒冷で飢饉が頻発しました。

太陽活動が不活発だったことや、世界的に火山活動が活発で日射を遮ったことなど、広い範囲に影響を及ぼす要因があったようです。

地域ごとの変化を比べる

【137】最近まとめられた過去1000～2000年間の地域ごとの平均気温には、次の三つの大きな特徴があります。

(1) 19世紀に至るまで一貫して、すべての地域で長期的な寒冷化が認められる。

(2) 20世紀になると、南極を除くすべての地域で温暖化に転じている。

(3) 19世紀以前の数十年から数百年周期の気候変動のパターンは、大規模な火山噴火時や太陽活動極小期に当たる一部の寒冷期を除いて、地域間、特に南北両半球間では必ずしも一致しない。これは、小氷期や中世気候異常期でも同じ。

【138】上の(1)は、太陽活動や地球軌道要素などの変化、すなわち地球が受け取る太陽エネルギーの長期変化を反映したものと考えられます。

(3)は、19世紀以前の太陽エネルギーの変動が、数十年から数百年という時間スケールでは、必ずしも地球全体で一様な気温の変動、特に温暖化を引き起こしてきたわけではないことを意味しています。

これらのことから、(2)の20世紀の地球全体の温暖化は、主に大気中の温室効果ガス濃度の増大によって生じたことが示唆されます。

【139】総合地球環境学研究所の中塚武は、日本・中国・インド・東南アジアなどの広域の樹木年輪データベースから、アジアの年単位の平均気温を再現しています。

樹木は通常、1年のうちに、春の成長が盛んな時期と成長がゆっくりな時期があるため、年輪を作ります。

成長期の成長速度はその時の気温に依存するため、年輪幅を図ることで当時の気温を推定できます。それによると、過去1200年間で変動が最も激しいのが12世紀から15世紀であり、日本では飢饉や戦争が繰り返された中世の時代に当たります。

この時代には急激な寒冷化と温暖化が繰り返し起きていたことになります。

温暖化の停滞（ハイエイタス）

【140】小氷期が終わる 19 世紀半ば以降は、世界の平均地上気温は変動を繰り返しながらも上昇してきました。

（1891～2013 年の「世界の平均気温の変化」のデータでは、100 年あたり +0.69℃になっています）。

特に 1980 年代以降は、年々の変動を見せながらも一貫して上昇する傾向を示していました。

ところが、1998 年に起こった史上最大規模のエルニーニョ現象発生時以降、2014 年に至るまで 15 年以上の間、気温の上昇傾向は停滞しています。

気温が低下したというわけではなく、10 年あたりで 0.03～0.05℃と、それまでと比べるとわずかな上昇傾向しか示していません。

【141】20 世紀後半に比べると暖かい状態であることに間違いありませんが、この地球温暖化の「停滞」現象（中断、休止を意味するハイエイタス hiatus と呼ばれている）は、地球温暖化が終わったのではないかとの疑問も呼びよくなり、大きな関心をもたれています。

ハイエイタスを説明できそうな外因としては、太陽活動の 11 年周期がたまたま低下期に当たっていることや、2000 年代に起こったいくつかの小規模な火山噴火（硫酸性エアロゾルを成層圏へ放出することで地球を冷やす作用がある）などが挙げられます。

しかし、地球観測衛星による地球の大気上端での観測は、2001～2010 年の 10 年間で、1 平方メートルあたり 0.5 プラスマイナス 0.43 ワットの余剰エネルギーを地球の大気・地表面系が受け取っている、というものです。

受け取るエネルギー量が減っていないということは、太陽活動の変化や火山噴火がハイエイタスの主因ではなさそうです。

温暖化の復活か

【142】近年では、世界のかなりの海域で、海面から水深 2000 メートルまでの水温データが推定できるようになっています。

こうしたデータから、1955 年以降に気候システムが受け取った余剰な熱の 93% が海洋に吸収され、蓄積されていることがわかりました。

この熱の蓄積により海水の温度が上がり、体積が膨張することで、海面水位が上昇しているわけです。

この海洋の熱の蓄積が、ハイエイタス期間には、表層数百メートルよりも深い層（具体的には 700～2000 メートルの層）でより多く起きていることがわかりました。

1990 年代は海面水温の上昇傾向が大きく、深い層での蓄熱量の増加傾向は相対的に小さいものでした。

しかし 2000 年代になると逆に、深い層での蓄熱量の増加が顕著になりました。

海洋中の熱の分配のされ方がほんの少し変わり、海面付近の水温の上昇傾向が小さく、余剰の熱は海洋深層に吸収されているのが、ハイエイタス期間ということになります。

大気の影響に直接影響するのは、深い層での水温ではなく、海面水温です。

この期間には、海面水温の上昇が小さいため世界平均の地上気温の上昇が鈍った（温暖化が停滞した）ように見えますが、海の深いところで水温が上昇を続けていたのです。

ハイエイタス期間の蓄熱の変化は、海面水位の上昇傾向とも一致しています。

つまり、余剰な熱の海の中での分配のされ方がほんの少し違っているだけで、温暖化自体は止まっていないということです。

【143】どうして海洋中の熱の分配のされ方が変わるのかは、よくわかっていません。

太平洋では、熱帯太平洋域と中緯度太平洋域で、海面水温の変化が逆のパターンで、10 年ほどの

周期で変動することが知られています（太平洋 10 年規模振動）。それが関係しているようだと考えられています。太平洋 10 年規模振動のような自然に起こる内部変動が主要因ならば、ハイエイタス期はまもなく終わり、逆位相の期間に入ることが考えられます。そうすると、海の深い層よりも表層での昇温がより活発に起こるようになり、これまで停滞していた温暖化は、逆に加速されるでしょう。この間に上昇した温室効果ガス濃度に「追いつく」ように、世界の地上気温は上がっていくでしょう。

次の氷河がやってくる？

【144】約 10 万年の周期で氷期と間氷期が交互にやってきました。今は間氷期で、それがすでに 1 年以上以上続いています。いずれ、次の氷期が到来するでしょう。地球温暖化を心配するより、氷期がやってくることを心配すべきなのではないでしょうか。最終間氷期は約 12 万 9000 年前から 11 万 6000 年前まで続いたとされています。その後ゆっくりと地球は寒冷化して氷期に入り、2 万 1000 年前から 1 万 9000 年前に最終氷期最盛期を迎えました。地球の公転軌道要素の変化や地軸の傾きの変化は、過去だけでなく将来にもわたって正確に計算できます。約 10 万年の周期とはいっても、複数の軌道要素が関係するので、いつもまったく同じ周期というわけではなく、それぞれの氷期・間氷期ごとに少しずつ異なる期間になります。

【145】いつ現在の間氷期から氷期に移行するかは、軌道要素だけではなく、大気中の二酸化炭素濃度にも関係します。古気候記録によると、軌道配置が現在に近いときには、大気中の二酸化炭素濃度が工業化以前の水準よりもかなり低い場合にのみ氷期が起こっていました。気候モデルの計算から、二酸化炭素濃度が 300ppm を超えたまま維持される場合には、今後 5 万年間に氷期は生じないでしょう。21 世紀に想定されている二酸化炭素排出シナリオの下でも、西暦 3000 年まで大気中の二酸化炭素濃度が 300ppm を超えていることは確かであり、軌道要素の変化によって今後 1000 年間に氷期がこないことはほぼ確実です。

温暖化の原因特定

【146】IPCC 第 5 次評価報告書（2013）は、「気候に対する人為的影響は、大気と海洋の温暖化、世界の水循環の変化、雪氷の減少、世界平均海面水位の上昇、およびいくつかの気候の極端現象の変化において検出されており、「人間による影響が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な原因であった可能性が極めて高い」と結論しました。

【147】IPCC の用語では、「可能性が極めて高い」とは、発生確率が 95%以上のことを指します。第 4 次評価報告書（2007）では「可能性が非常に高い（発生確率が 90%以上）」としていましたので、この間の科学の進展により、より確からしくなったと言えます。気候変動の要因を気候システム内部の変動と、太陽など外部によるものに分け、過去の観測データから気候の変動を同定し、それに対する人為的な強制力の影響を定量的に評価することで、上記の結論が導きだされました。

【148】気候モデルを使った数値実験では、自然起源のみの強制力、人間活動による強制力（温室効果ガスやエアロゾル）および両者の強制力の影響を別々に評価できます。これらの数値実験では、太陽放射や火山活動の自然起源の変動を考慮しただけでは、最近数十年に

観測された急速な温暖化を再現できません。

一方で、温室効果ガスなどの人為起源の影響や重要な外部要因をすべて組み込めば、気候モデルは観測された 20 世紀の気温変化を再現することができます。

これらは、世界全体だけでなく、大陸ごとの気温変化についても言えます。

なお、大気中エーロゾルの寒冷化効果がなく、温室効果ガスだけだったなら、過去 50 年間に観測されたよりも大きな世界平均地上気温の上昇を引き起こした可能性が高いとされています。

異常気象の原因特定

【149】異常気象の増加には、地球温暖化が効いているのでしょうか？

これは、地球温暖化の原因のように、平均的な気候の状態や長期の変化傾向について原因を特定することとはまた別の問題です。

異常気象や極端現象は、人間活動の影響がない場合でも、気候システムの中で自然に生じうる現象です。

そのため、ある特定の現象（イベント）の発生が、決定論的に人間活動によるものと判断することはできません。

しかしながら、イベントの発生確率が人為強制力によってどの程度変化したのかを評価することは可能です。

2003 年のヨーロッパ熱波を契機として、人間活動（特に温室効果ガスの排出）により、個々の自然災害をもたらしたハザード（熱波や大雨など、一般に災害外力をいいます）の発生の確率がどの程度変化したのかを評価する試みが行われるようになりました。

気候モデルを用いた多数例の数値実験を行い、人間活動に起因するイベントの発生確率がどの程度変化したのかを評価します。

これを異常気象の原因特定（イベントアトリビューション）と呼んでいます。

4. 太陽活動が気候に影響するメカニズムを見る

■■気候に影響するメカニズム■■

【150】古気候記録や観測記録を総合的に見ると、太陽活動に連動して高緯度地域では北極振動に似たパターンが生まれている。

低緯度地域では、エルニーニョ、ラニーニャに似たパターンの変動が起こっている。

赤道域から中緯度域ではハドレー循環が強まったり弱まったりしているらしい。

じつは太陽活動が最大のとくと最小のときの全球平均の気温差は、あまり大きくないのです。

そこがポイントです。

太陽活動が気候に与える影響は、地球全体を暖かくするとか寒くするというよりは、パターンを変える。

それもランダムに変えているわけではなくちゃんと規則性を持っていて、地球自体が持っているいくつかのパターンを強めたり弱めたりしているらしいとわかってきました。

【151】こうしたことがここ 10 年ぐらいの間に急速に明らかになり、太陽活動が気候に影響を及ぼすということが、いまではかなり有力な見方になっています。

ただ、それは単純に暖くなる、寒くなるというものではなく、むしろ暖くなる地域と寒くなる地域、湿潤化する地域と乾燥化する地域のパターンの変化として現れ、それには地球を構成するサブシステムがその振動を強めたり、弱めたりすることが関与しているらしいこともわかってきました。

【152】あとは、どういう物理化学メカニズムがそういうことを引き起こしているかがわかれば、問題の解決へとぐっと近づくとおもいます。

あと5年ぐらいでほしいと解明されるのではないかとおもうのですが、現在は有力な仮説が三つ挙げられています。

一つ目が、太陽の明るさの変化は微々たるものだけれど、それでも直接的な総放射量の変化が太陽放射を最も多く受ける赤道域では効くのだという説です。

シミュレーションの詳細は複雑なので、ここでは定性的な話だけをします。

太陽活動が活発化すると赤道域は加熱されます。

太陽活動の活発化による直接的加熱が引き起こす温度変化は、全球平均で0.1°Cに満たないのですが、赤道域は太陽に垂直に向いているので極域に比べると加熱の程度が大きいのです。

東赤道太平洋では、深層水の湧昇が起っていますが、それは、貿易風が吹いて、それが大陸側から沖合に向かって表層の水を流し、それを補うように下から冷たい水が上がってくることにより起こるのです。

その結果、赤道太平洋の西と東での温度差が発生するのですが、この温度差がいったん発生すると、さらに貿易風を強めて優勝を強める。

すると温度差がさらに強まる。

そして、ついにラニーニャ的なパターンを生み出すというのです。

【153】二つ目の説は、オゾンに注目しています。

これがいま、多くの研究者がいちばん重要だと考えはじめている説です。

大気中、特に成層圏にはオゾンがたくさんあります。

そして、オゾンは温室効果ガスです。

しかも、オゾン加熱するには紫外線（UV）が最適なのです。

太陽活動に伴う変動は、可視領域ではたかだか0.1%ですが、紫外領域では4%も変わります。

ですから太陽活動に伴って、じつは成層圏や、その上の中間圏の温度は大きく変わる。

ただし最近まではそうした変動が地表に伝わるメカニズムがよくわかっていませんでした。

なぜわからなかったかということ、気候変動予測や気象予報によく使われるような大型コンピュータを用いた大気循環モデルでは、通常、成層圏下部までしか考えていなかったからです。

成層圏上部まで含めて、さらにオゾンの影響を組み込んだモデルを使うと、大気上層での加熱が下層に伝わる様子がだんだん見えてきたのです。

【154】要するに、太陽からの紫外線の変動がオゾンによる温室効果を大きく変えている。

大気上層で温度変化だけを見ると、とてつもなく大きく変わっているのです。

大気上層ではガスの濃度は非常に薄いので、大気の質量としては圧倒的に多い対流圏に、そんな濃度の薄い大気上層での変化がどう伝わるのかがむしろ疑問だったのですが、風を介してだんだん下に伝わって、最終的には地表にまで到達する様子がシミュレーションによって復元できたという研究が最近出てきました。

しかも、紫外線は大気上層でオゾンをつくり出す反応を促進するのです。

オゾン濃度が太陽活動の11年周期に応答して変動している、しかも、太陽活動が活発なときにはオゾンによる温室効果を強めるほうに働いていることが明らかになってきました。

【155】紫外線のオゾンに対する効果を組み入れて、マウンダー極小期（西暦1650~1700年ころにかけて、太陽に黒点がなかった時期が見られます。これは「マウンダー極小期」と呼ばれており、太陽から黒点が消えた時代として有名です。）にどのような気候変化が起こったかを見るモデル実験も行われています。

その例の一つを見ると、やはり暖かいところ、寒いところの分布パターンはモザイク状になっていて、地球全体が寒くなっているわけではないですね。

また、極域で寒くなっており、その周りでは相対的に暖かくなっていますが、これは北極振動のパターンと似ています。

最近、さらに高度なシミュレーションの研究が「ネイチャー・ジオサイエンス」という雑誌に出て、太陽活動の変化によって、きれいな極振動を生み出すことができることを示しました。このときの半球平均の温度の変化というのはたかだか0.3℃ですが、その気温の分布パターンが大きく変わります。北極振動のマイナスのモードに似たパターンが、シミュレーションで作り出されたわけです。

【156】三つ目の説は、宇宙線と雲の量の関係に注目します。これは一部の研究者が非常に熱意をもって発信しているもので、これが真理だと思っている方も多いようです。この宇宙線と雲の関係を全否定するわけではないのですが、じつはまだ十分検証されていない説明だと思われまます。もともとスpensマークという人が主張したのですが、その主張の根拠を示したグラフがあるので。そのグラフでの黒線は地表での中性子フラックスの変化ですが、これは銀河宇宙線の入射量の変化と見ることができます。青線は、衛星写真の解析に基づく、地球を覆う低層雲の量です。彼らは、宇宙線フラックスと低層の雲の量がこれだけきれいに関係しているの、これは宇宙線が大気中で雲をつくることを示していると主張しています。宇宙線で雲をつくりだすことが可能であることを一応実験で示しているの、まったく根拠のない説というわけではありません。しかし、彼らが示している、低層雲の量と宇宙線の入射量の相関の空間分布の図を見ると、地球全域でよい相関を示しているわけではなく、相関の高いところは中緯度域です。

【157】太陽活動が活発化したときにハドレー循環の上昇流が強くなり、幅も広がるのが、観測事実としてかなり確立してきました。したがって、ハドレー循環などの大気循環が変化することによって、中緯度域の雲の量が変わる可能性もあります。実際、太陽活動の気候への影響を見るために、オゾン生成の光化学反応を考慮に入れてシミュレーションをすると、やはり中・低緯度の気候パターンが変わるのです。スpensマークは、宇宙線と雲の量の変動パターンが似ているから因果関係があるという論理を使っていますが、宇宙線の変動パターンと太陽活動のパターンも似ています。太陽放射量の変化により中・低緯度の気候循環が変われば、当然雲の量も変わります。そういうプロセスによっても雲の量の変化は説明できてしまうのです。だから、銀河宇宙線が雲をつくってそれが気候を変えているという説は、因果関係のステップを1ステップ抜かして宇宙線と雲の量を直接結びつけようとしているようにも見える。その抜けているステップをつながないかぎり、ほかの二つの説と同じ水準には到達しないと思います。

■■太陽活動の温暖化への寄与■■

【158】世の中でなされている議論には、往々にして、太陽活動が温暖化の原因でCO₂ではない、もしくはCO₂が原因で太陽活動は関係ない、そういう二者択一的なものが多いのですが、実際はおそらく両方が関係していると思われまます。ではどちらがどのくらい関係しているのか。それを明らかにすることがこれからの課題になってくると思うのです。グラフの黒線は平均気温の時代変化の観測値です。青線は太陽活動の変化、人為的なCO₂濃度の変化、火山噴火、そしてENSO（エルニーニョ、ラニーニャのような現象がこう呼ばれている）のすべてが、これにある割合で影響していると考え、それぞれにある係数を掛けて足し合わせてやると、どういう係数を掛けたときにいちばん実際の変

動に近い結果が出るかを見たものです。

物理化学的な根拠は入っておらず、ただ係数を変えながら実際のデータとの相関を見て、最も近い結果を出す係数の組み合わせを求める。

どこか競馬の予想みたいで、とにかく当たるをよしとするようなアプローチですが、そういうことを試した例です。

ENSO も太陽活動とリンクしているので、ENSO を独立要因として入れるべきかどうかは議論の余地がありますが、ここでは一応入れています。

そうすると、図の青線に示されるように、実際のデータとそこそこ合う結果が得られます。

次の図は、実際のデータ（平均気温の時代変化の観測値）と合う条件でそれぞれの要因（太陽活動の変化、人為的な CO₂濃度の変化、火山噴火、そして ENSO）が温度に換算してどれぐらい影響しているかという内訳を示しています。

ENSO はせいぜい 0.1 ぐらいとあまり効いておらず、太陽放射も 0.07 と小さい値です。

これに対し、人間活動による CO₂濃度変化の影響は 0.8 と一桁大きい。

じつは、太陽放射の 0.07 という値も、放射平衡を考えたときには妥当な値なのです。

ただ、ここでもう気づいた方もいるかと思いますが、これは平均温度での議論ですけれども、太陽活動は平均温度を上げるよりも気候パターンを変えるほうの影響が大きいのでしたね。それを考えないと、真の意味での太陽活動の気候への影響の評価はできないと思います。

【159】ここまでをまとめると、（１）太陽の総放射量変動の影響は、赤道域で起こる正のフィードバックで増幅されている可能性がある。

（２）いちばん大きい影響を与えていると思われるのが、紫外線による成層圏でのオゾンの生成とオゾンを暖める温室効果で、これが特に中・低緯度における大気循環を通じて気候に影響を及ぼしている可能性が大きい。

これはシミュレーションでも再現できるようになってきていますので、かなり確実に言えそうです。それから、この（１）と（２）を両方考慮したシミュレーションも試みられるようになり、それによって実際観察される（気候パターンの）変動の大体 7～8割ぐらいは説明できると言われています。

（３）銀河宇宙線が雲の量を変える可能性は否定しません。しかし、まだ十分に検証されたといえる説ではありません。

【160】20 世紀以降の温暖化の 8～9割は、やはり CO₂に起因する可能性が高いのですが、残りの 1～2割が太陽活動に起因する可能性があるというのが、ゆるぎない結論とまでは言えないのですけれども、ここでの話題の結論です。