

# 温暖化の科学

2024年12月15日

©2024 近藤邦明

## 目 次

1. 地球史的に見た表面環境の変化	4
1-1 原始地球の誕生	5
1-2 地球の内部変動とウィルソンサイクル	9
(1) プレートテクトニクス開始	9
(2) 大陸プレートの分化(大陸地殻の成因)	10
(3) 海洋プレートのライフサイクルと環境変化	11
1-3 固体地球の変動と地表面環境の変化	15
(1) 冷却を続ける地球	15
(2) ウィルソンサイクルと氷河期	16
(3) 全球凍結と海水のマントルへの逆流	18
(4) 固体地球と生態系の進化	22
(5) 地球大気の進化	25
1-4 地球史の中の現在の地球	28
(1) ウィルソンサイクルの現在	28
(2) 現在の地球の気温	29
(3) ミランコビッチ・サイクルと氷期-間氷期サイクル	31
(4) 気温によって変動する CO <sub>2</sub> 濃度、CH <sub>4</sub> 濃度	32
(5) 完新世の気温変動の概要	33
1-5 氷河期の気温変動と太陽放射	36
(1) 太陽黒点数と太陽放射	36
(2) 太陽黒点数と侵入宇宙線量	38
(3) 歴史的な気温変動と太陽活動	40
(4) 産業革命以後の気温変動と太陽放射	42
1-6 気象学を政治の道具にした Climategate 事件の本質	45
(1) GHCN による補正という名の DATA 改竄	46
(2) 気象観測点の恣意的な選択による影響	48
(3) 世界平均気温偏差の歴史的変遷	53
1-7 結論～固体地球と表面環境の共変化	57
2. 人為的 CO <sub>2</sub> 地球温暖化説の科学	60
2-1 CO <sub>2</sub> 濃度上昇の主因は気温上昇	62
(1) 地球表面環境の炭素循環	62
(2) CO <sub>2</sub> 循環モデル	63
(3) Keeling 曲線に対する考察	67
(4) 化学平衡から考える大気中 CO <sub>2</sub> 濃度	69
2-2 大気中 CO <sub>2</sub> 濃度に対する槌田-近藤の分析	72
(1) 大気中 CO <sub>2</sub> 濃度モデルの構築	72
(2) 大気中 CO <sub>2</sub> 濃度と気温の経年変化	74

(3) 気温の時間変化率と大気中 CO <sub>2</sub> 濃度の時間変化率 .....	75
(4) 気温と大気中 CO <sub>2</sub> 濃度の時間変化率 .....	76
(5) 気温と大気中 CO <sub>2</sub> 濃度時間変化率の散布図 .....	77
(6) 大気中 CO <sub>2</sub> 濃度についての考察 .....	78
参考: 人為的 CO <sub>2</sub> 蓄積モデルについての考察 .....	83
(7) 結論—人為的 CO <sub>2</sub> 地球温暖化は存在しない .....	89
2-3 気温と温室効果 .....	91
(1) 氷河期の地球温度状態 .....	91
(2) 黒体放射と熱放射 .....	92
(3) 温室効果の発現機構の概要 .....	93
(4) 水蒸気 H <sub>2</sub> O、二酸化炭素 CO <sub>2</sub> の赤外活性 .....	96
(5) キルヒホッフの法則 .....	99
(6) 大気の下端と上端の放射 .....	101
(7) 赤外活性気体の気温に対する効果 .....	103
3. 幾つかの気温の変動要因 .....	109
3-1 地球の大気・表面環境の熱収支 .....	111
(1) 熱収支の概要 .....	111
(2) 地表水の蒸発量の変化 .....	113
(3) 工業的エネルギー消費の影響 .....	114
(4) 局所的な影響と大局的な変化 .....	116
3-2 太陽活動と気温 .....	118
(1) 太陽放射の変動と気温変動 .....	118
(2) 太陽磁場と気温変動(スベンスマルク効果) .....	119
3-3 その他の気温変動要因 .....	123
(1) 月の公転軌道と気温変動 .....	123
(2) 海洋と気温変動 .....	124
3-4 結論 ~長期の気象予測は不可能 .....	126

## 1. 地球史的に見た表面環境の変化

現在、世界を混乱させている人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説を前提とした「温暖化論」は、地球史的に見るとほとんど一瞬の出来事を近視眼的に解釈したものです。少しタイムスパンを広げて見るだけで様々な誤りが見えてきます。

この「温暖化論」を評価する前に、地球史的に見た地表面環境の激変の歴史を概観するとともに、地表面環境を考える上で重要な要素を確認しておくことにします。

### 参考文献

- 1) 生命と地球の歴史／丸山茂徳、磯崎幸雄 著／岩波新書
- 2) プルームテクトニクスと全地球史解説／熊澤峰夫・丸山茂徳 編／岩波書店

## 1-1 原始地球の誕生

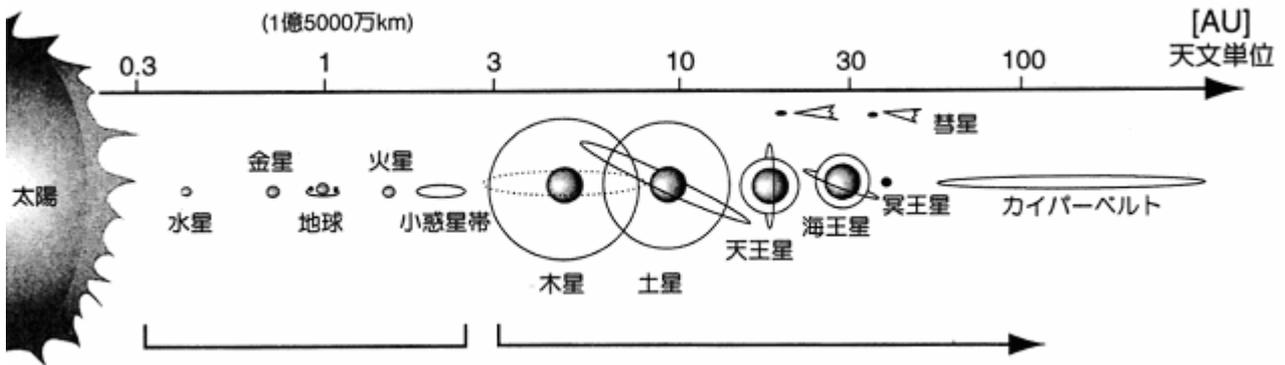


図 1-1 太陽系の構造

地球は太陽系を構成する「地球型惑星」の一つです。

主星である太陽の公転面に円盤状に広がっていた塵が引力で引きつけ合う事で少しずつ塊が形成されました。太陽に近いところの塵は質量の大きな岩石や金属鉄を主体とし、遠いところの塵は水蒸気が凝結した氷粒が主体でした。この塵の構成の違いが地球型惑星と木星型惑星を分けました。

太陽に近い水星から火星までは「地球型惑星」であり、中心から半径 1/2 程度の金属核、その外側の 1/2 は岩石で構成されています。

木星より外側の惑星は、中心に岩石の核を持ちその周りを水素が取り巻いている「木星型惑星」です。

46 億年ほど前、太陽の中心から 1.5 億 km 付近に地球となる微惑星が出来、次第に周囲の微惑星を引き付け、衝突・合体を繰り返して成長し、原始地球が出来上がりました。微惑星の衝突エネルギーは熱エネルギーとなり、微惑星を構成する物質からガス成分が蒸発し、これが原始地球の引力に捉えられて原始大気が出来ました。

原始地球は、微惑星の衝突エネルギーが熱となり高温になったために、岩石と金属の混合物が溶融してマグマオーシャンになりました。マグマオーシャンから質量の大きな金属鉄が分離して原始地球の中心部に集まり核が形成され、金属核の外側に鉄物質のマグマオーシャンが残りました。

原始地球は当初、主に水蒸気  $H_2O$  を主体とし、二酸化炭素  $CO_2$  を含んだ数 100 気圧の分厚い大気に覆われていました。原始大気は  $1000^\circ C$  をはるかに超えるマグマオーシャンの表面とほとんど絶対零度に近い宇宙空間との間の原始大気の激しい対流運動で急速に冷却されました。

原始大気は上空で赤外線放射によって冷やされ、凝結した水蒸気は雨として落下しましたが、地表面に到達する前に加熱されて再び水蒸気になり上昇しました。

冷却されたマグマオーシャンは表面から次第に固化しました。地球の表面が冷却された結果、雨が落下して再び水蒸気になる高度は下がり続けました。やがてその高度が地表面に到

達し、地表面に雨が降り続くことになりました。そして 43 億年前にマグマオーシャンは全て固化しました。

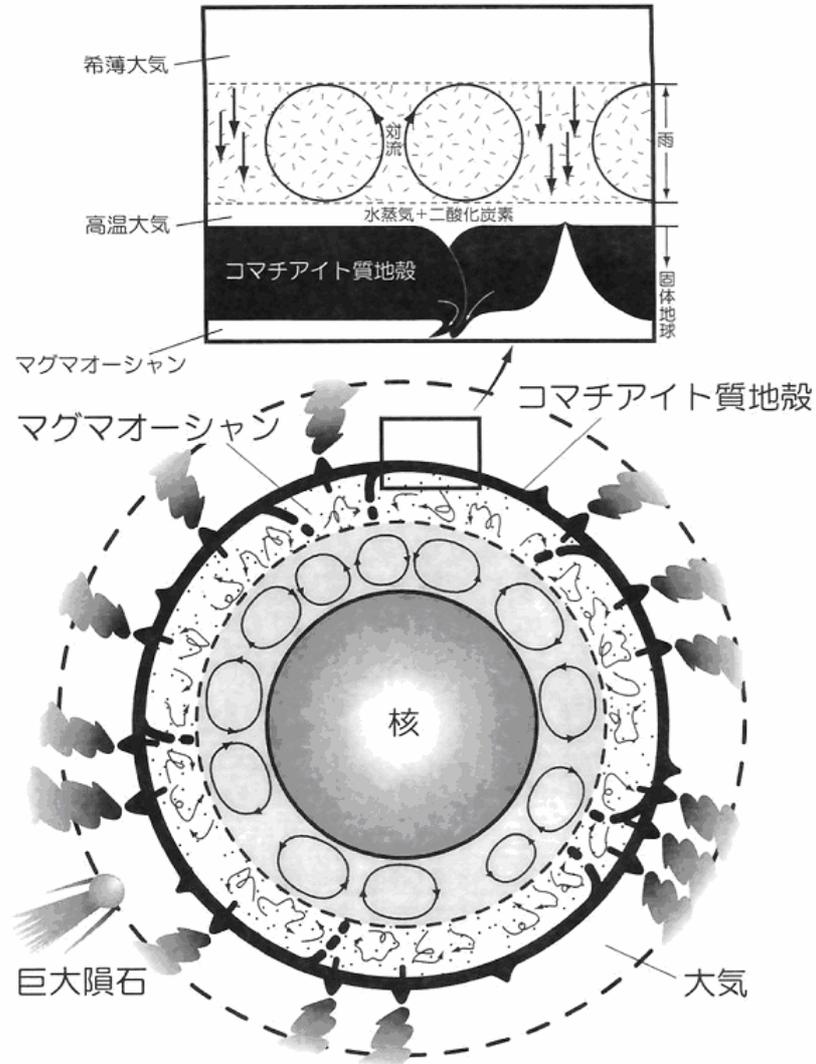


図 1-2 44～43 億年前の地球(原始海洋はまだ誕生していない)

原始地球大気の大気圧はどの程度だったのでしょうか？現在の地球の海の面積は全表面積の 70%程度で、平均水深は 3800m 程度と見積もられています。全表面積に対する平均水深に換算すると次の通りです。

$$3800m \times \frac{7}{10} = 2660m$$

原始地球に存在した海水は、マンツルの冷却に伴って、含水鉱物となって上部マンツルに吸収されています。これまでに吸収された海水量を水深 200m 程度に相当するとして、原始海洋の平均水深を 2860m 程度であったとします。これは気圧に換算すると約 286 気圧になります。

水蒸気 H<sub>2</sub>O を主体とした原始地球大気の大気圧は少なくとも 286 気圧を超えていたと考えられます。更に二酸化炭素 CO<sub>2</sub> の圧力を考慮すると原始大気の大気圧は 300 気圧を超えて

いたと考えられます。

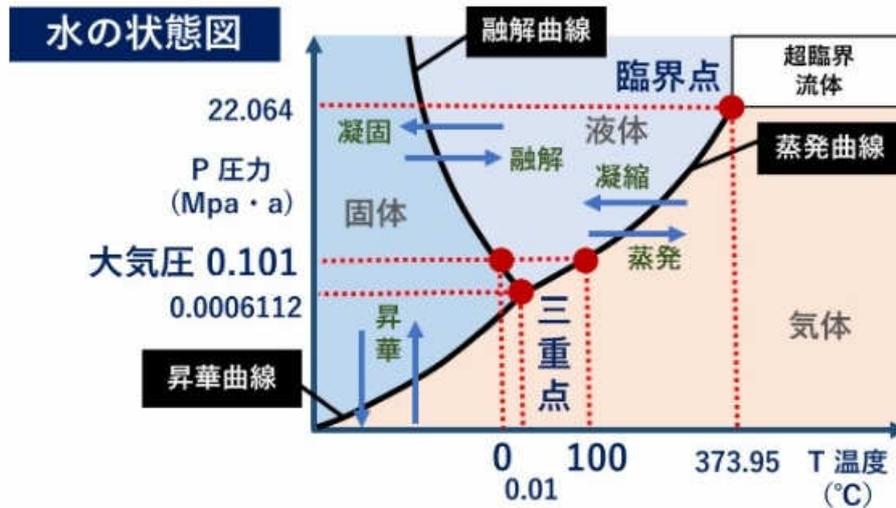


図 1-3 水の状態図

原始地球を覆っていたマグマオーシャンの表面温度を  $1500^{\circ}\text{C}=1773\text{K}$  程度と仮定します。水の状態図から水の臨界点の圧力は  $22.064\text{Mpa}\div 220$  気圧です。したがって、原始地球のマグマオーシャンに接する原始地球大気は超臨界流体であったと考えられます。

原始地球大気の大気対流運動で放熱が進み、マグマオーシャンの表面は冷却され次第に固化が進行しました。表面温度の低下で雨は地表面に到達し始めると長い雨の期間が続きました。

約 43 億年前、原始地球が出来てから 3 億年ほど経過した頃、マントルは全て固化してマグマオーシャンが消滅しましたが、それでも水が液体として安定して地表面に滞留するほどにまで冷えるには更に時間が必要でした。

さらに数億年が経過し、ついに雨水が地表面に溜まり始め、原始海洋が形作られ始めました。海水の増加に伴い、地球大気からその主体であった水蒸気が急速に取り除かれ、原始地球大気の大気圧は急速に低下し、地球大気は薄く透明になりました。

海水の増加に伴って、大気に含まれていた二酸化炭素も雨水に溶解し原始海洋に吸収されたため、大気中の二酸化炭素濃度も急速に小さくなりました。

そして 40 億年前、原始海洋が出来上がりました。

原始地球の表面が高温でマグマオーシャンだったのは数 100 気圧の原始地球大気の猛烈な温室効果が原因であるという話を聞くことがあります。それは誤りです。

温室効果「greenhousu effect」とは、現在の地球の表面環境を暖める主要な熱源である太陽放射（表面温度  $6000\text{K}$  程度の太陽表面から放射される  $0.5\mu\text{m}$  程度の波長にピークを持つ電磁波）に対して、現在の地球大気はほとんど透明であるために大部分（70%程度）が地表面に達してこれを暖めることを前提にしています。

地球から宇宙空間への放熱は赤外線放射によります。大気がない場合には地表面からの赤外線放射で放熱します。現在の地球であれば  $254\text{K}=-19^{\circ}\text{C}$  程度です。

実際には地球大気があるために  $288\text{K}=15^{\circ}\text{C}$  程度にまで昇温します。これは、地球大気に含まれる水蒸気を中心とする赤外活性気体が一旦地表面放射のエネルギーを吸収して、これ

を分子衝突によって大気を構成するすべての気体分子の並進運動エネルギーとして分配し、大気に「蓄熱」しているからです。

大気低層で地表面放射は大気に吸収されるために、地表面放射はほとんど宇宙空間に放熱されません。

例外的に大気中の水蒸気密度が異常に低い砂漠や寒冷な地方では、大気が地表面放射をあまり吸収しないために、地表面放射の多くが宇宙空間に達して放熱します。この現象を「放射冷却」と呼びます。

標準的な現在の地球大気では、地表面ないし低層大気中での赤外活性気体による赤外線放射は周囲の赤外活性気体に吸収されるため、宇宙空間にまでは到達しません。地球からの放熱は地球大気の大気圏中層から上層の赤外活性気体からの上向きの低温赤外線放射で賄われています。

このように、温室効果とは地球大気が太陽放射という外部熱源からの可視光線を中心とする波長の短い電磁波に対しては透明であり、これに対して、地表面からの波長の長い赤外線に対しては不透明である性質を指すものです。

原始地球表面がマグマオーシャンであった理由は、第一に地球を形作った塵や小惑星の運動エネルギーが衝突を繰り返すことで原始地球内部に熱エネルギーとして蓄積されたことです。

原始地球大気が数 100 気圧と分厚かったことによって、大気の蓄熱量が大きく、宇宙空間への赤外線放射は分厚い大気上層からの赤外線放射によってゆっくり放熱されたため、原始地球表面からの内部熱の放熱速度が遅かったために比較的長期間マグマオーシャンの状態が続いたと考えられます。

## 1-2 地球の内部変動とウィルソンサイクル

### (1) プレートテクトニクスの開始

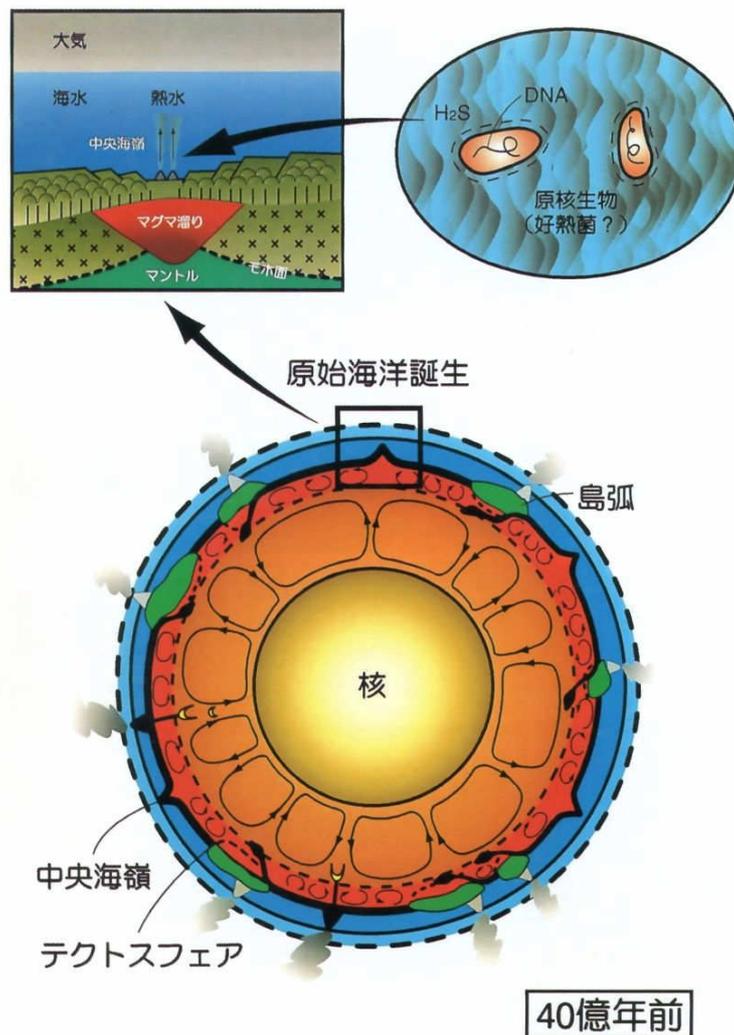


図 1-4 40 億年前の地球

およそ 40 億年前、金属核、マントル、海洋、大気から構成される地球の基本構造が出来上がりました。この段階ではまだ大陸は存在していません。その後の地球の変動・進化の過程で大陸が形作られました。

地球が冷却されて、雨が水として地表面に溜まり始めると、原始大気的主要な構成要素であった水蒸気が取り除かれることで、急速に地球の大気は薄く、透明になりました。原始大気に含まれていた CO<sub>2</sub> も雨に溶解し海洋に吸収され大気中の CO<sub>2</sub> も急速に減少しました。

大気が薄くなったことで、固体地球から宇宙空間への赤外線放射による放熱量が急増し、マントルの表面は急速に冷却されました。1000°Cを超えていたマントルの表面温度がわずか 1000 年で 130°C程度まで低下したという試算もあります。

このように高温のマントルが急速に冷却された結果、マントルの表面は硬化し直線的な亀裂が生じました。こうして固体地球の表面は十数枚の剛体的なプレートに分割されました。

この亀裂に向かって上昇したマントルによって「中央海嶺」が形成され、減圧されたマン

トルは溶融してマグマとなって海底に放出されます。固化したマグマは水平方向に拡大し移動していきます。この固化したマグマが海洋地殻です。

冷却されて固くなった上部マントル外縁と海洋地殻を合わせて「海洋プレート」と呼びます。

海洋プレートは中央海嶺で生み出され、水平方向に移動します。隣のプレートとの境界において、一方のプレートが海溝から他方のプレートの下に潜り込みます。

現在では海洋プレートが大陸プレートの下に潜り込むとされています。しかし、原始地球には大陸は存在しなかったため、すべてが海洋プレートでした。海溝において隣接するどちらのプレートが潜り込んだのか、その条件はよくわかりません。

## (2) 大陸プレートの分化（大陸地殻の成因）

プレートが生まれた当初、すべてのプレートは海洋プレートでした。何らかの条件でプレート境界で片方のプレートがもう一方のプレートの下に沈み込むことになりました。

中央海嶺で生まれた海洋プレートの上には海棲生物の死骸や、大陸が出来た後には泥や砂などの堆積物、そしてプレート内のホットスポットで生まれた火山島などがありました。

海洋プレートが海溝から沈み込むとき、プレート堆積物や火山島、あるいは海洋地殻の一部が剥ぎ取られてもう一方のプレートに付加されました。

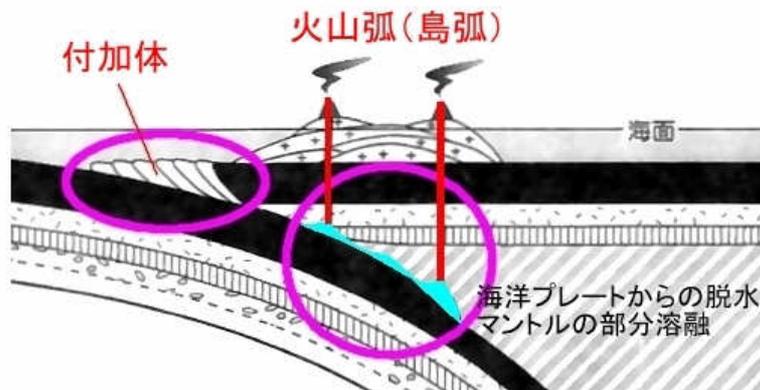


図 1-5 付加体と弧状列島の成長

海溝からマントルに沈み込んだ海洋プレートは周囲より低温でした。含水鉱物を多く含む海洋プレートは、深度が大きくなると周囲の高温・高圧の環境によって水分を放出します。沈み込み帯で水分が多くなった上部マントルは溶融温度が低くなるために溶融してマグマを作ります。マグマは上昇して上側のプレートに火山弧（島弧）を形成します。したがって、プレート境界の沈み込み帯の上に弧状の火山（列）島が形成されることとなります。

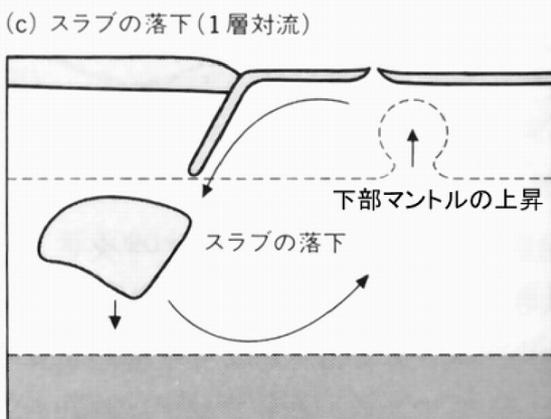
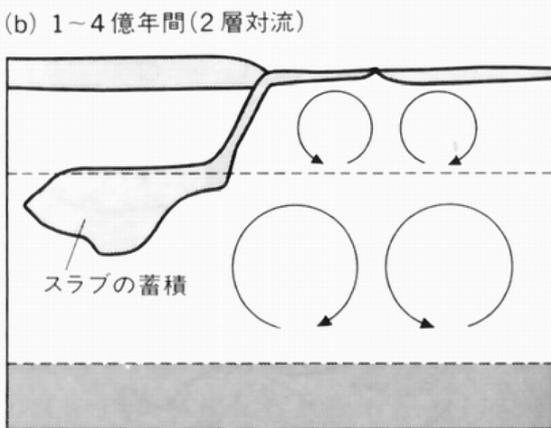
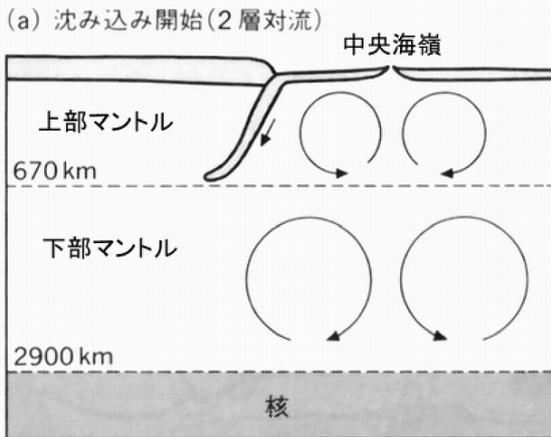
こうしてプレート境界において、沈み込まなかった海洋プレートには、付加体と火山弧によって海洋地殻（5km 程度）よりもはるかに厚い大陸地殻（30～60km）が形成されました。付加体や火山弧はマントルよりも密度が小さく軽いため、大陸プレートは海洋プレートよりも軽くなり、マントルに沈み込むことはなくなりました。

このように、地球の陸地は主にプレート境界付近で生まれ、プレートの運動で次第に合体

し成長したのです。

### (3) 海洋プレートのライフサイクルと環境変化

これまで見てきたように、海洋プレートは中央海嶺で生み出され、水平方向に移動し、海溝部で上部マントルに沈み込みます。上部マントルに沈み込んだプレート＝スラブは高温・高圧で脱水されながら上部マントルの中を下降します。



マントルは均質ではなく、温度、圧力、密度などの違いで地表面から 670km 程度の深さで上部マントルと下部マントルの明瞭な物理・化学的な境界があります。

40 億年前、プレートテクトニクスが始まった頃の上部マントルは高温であったため、上部マントルに沈み込んだスラブは 670km の上下マントル境界に到達する以前に周囲と同じ温度状態にまで温度が上昇して上部マントルに同化したと考えられます。

次第に上部マントルの温度低下が進むと、スラブは十分暖められず、深度 670km に達しても周囲の上部マントルと同化しないまま、上部マントルと下部マントルの境界付近に一旦滞留することになりました。

こうして、海洋プレートは中央海嶺で生産され、水平移動して海溝に至り、その後上部マントルを降下して上部マントルと下部マントルの境界に到達するというライフサイクルを持つこととなります。

中央海嶺で生まれてからマントル境界で滞留するまでの寿命は 1～2 億年程度だと考えられます。したがって、海洋プレートの寿命は、マントルに降下することのない大陸プレートに比較して著しく短命です。

図 1-6 海洋プレートのライフサイクル

1970 年代にプレートテクトニクス理論が提起されたとき、海洋プレートは下部マントルを降下して核にまで到達するとして、マントルの全変動機構はプレートテクトニクスで説明できるのではないかと考えられました。しかし、近年の研究から、プレートテクトニクスが支

配しているのは地球の表面環境から上部マントルまでと考えられるようになりました。

マントル境界部に蓄積したスラブは、数億年を経て大きな塊＝メガリスとなり、27億年ほど前に下部マントル中を降下して核の上に到達しました。

この時、メガリスの降下によって、上部マントルから外核の表面に至る冷たいマントルの流れである「コールドプルーム」が発生しました。

冷たいメガリスによって外核の表面が冷却されました。これは液体鉄で出来た外核に大きな影響を与えたでしょう。東京工業大学の丸山茂徳らは、27億年ほど前に起きたメガリスの核への落下によって、液体鉄の外核に異常な低温部が出来たことで外核の金属鉄の激しい対流運動が生じ、強い地球磁場が生まれたと考えています。

メガリスが落下するまでは、上部マントルと下部マントルは質的な違いがあり混合することはない、上下2層の対流構造でした。メガリスが上部マントルから下部マントル中に落下したことによって、これを補償するように高温の下部マントルが上部マントルに移動することになり1層の対流構造になったと考えられます。この上下マントルの混合という1層の対流をマントルオーバーターンと言います。

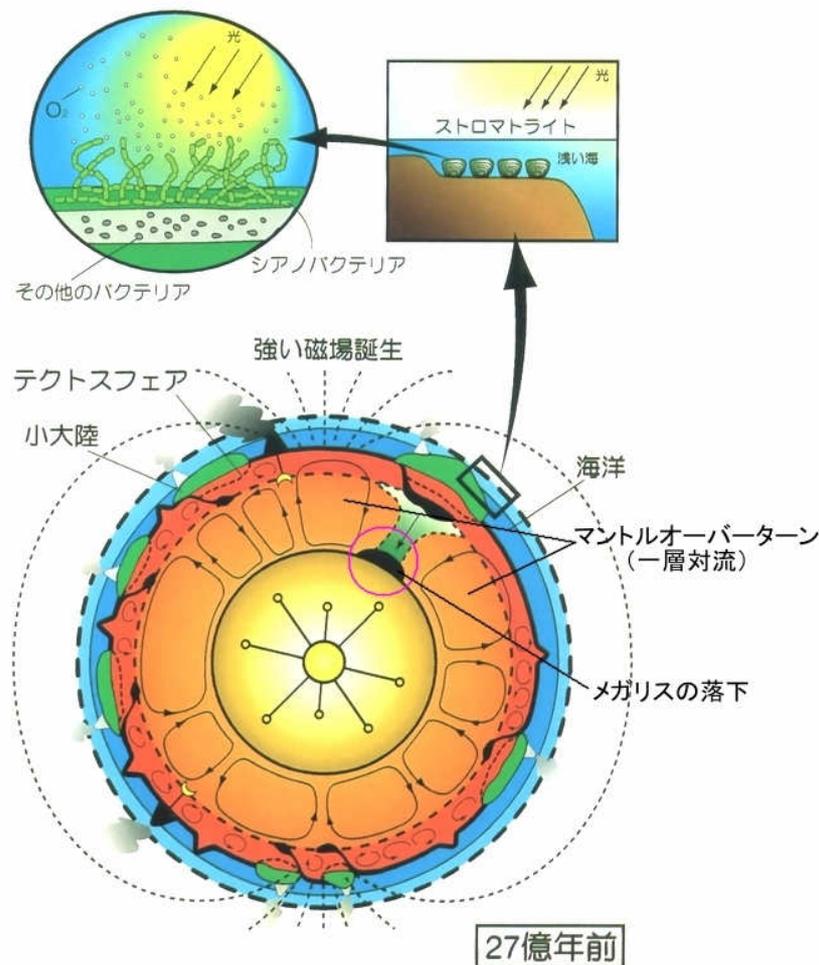


図 1-7 マントルオーバーターンによる環境の激変

マントルオーバーターンが発生すると、上部マントルの温度が急上昇します。同時に、高

温・高圧の下部マントルが上部マントルと入れ替わることによって減圧され溶融して大量のマグマが生じます。

こうしてマントルオーバーターンによって地表面環境は高温化し、同時に激しい火成活動が起こりました。27億年前のマントルオーバーターンによる激しい火成活動は、地球史上最も激しい火成活動期の一つです。

メガリスの下部マントルへの落下は1～数億年の周期で起こると考えられます。したがって、地表面環境の温度、火成活動は不連続・間欠的に変動することになります。

#### (4) 超大陸の誕生とウィルソンサイクル

27億年前のメガリスの落下によって発生したマントルオーバーターンによって下部マントルが上部マントルと入れ替わることによって激しい火成活動が起こり、大陸地殻の急激な拡大があったと考えられます。その後も海洋プレートの沈み込み帯では付加体や火山弧が発達を続け、大陸地殻が増加し続けました。

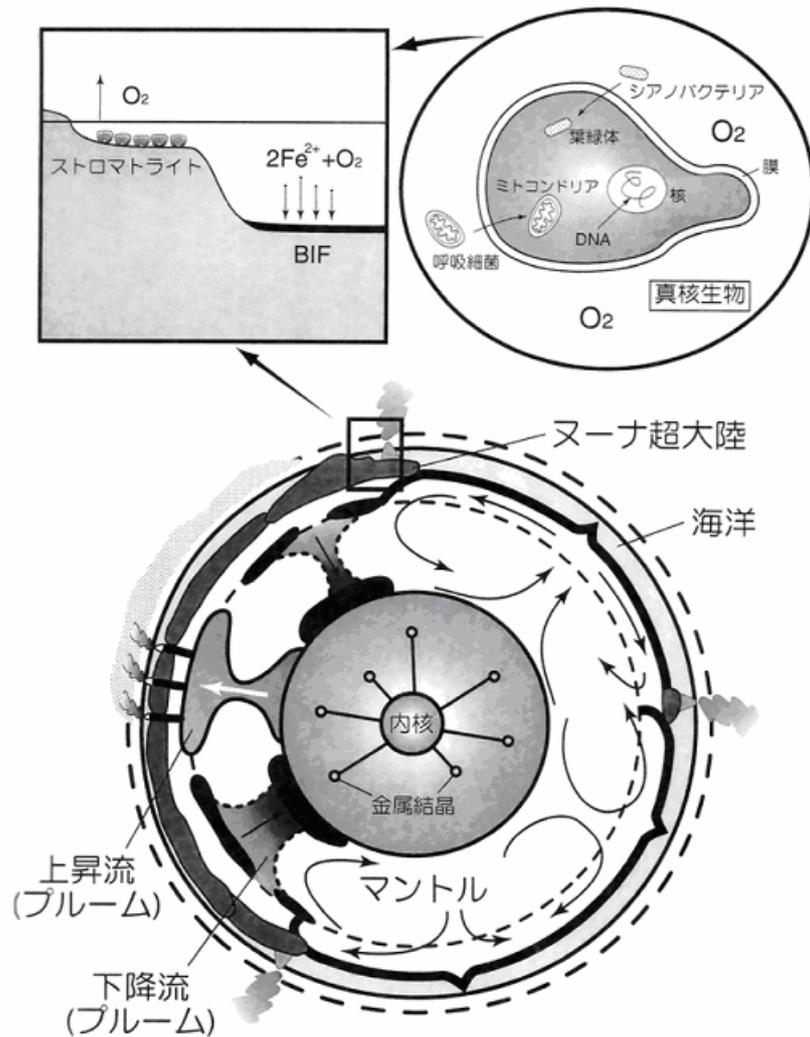


図 1-8 19 億年前の地球

次第にマントルの冷却が進みマントルの粘性が大きくなる(流動性が小さくなる)ことで、

プレートの生産速度、マンツルの対流速度が低下するとともに、コールドプルームの融合・合体が進みコールドプルームの数が減少し、大型化しました。

19億年ほど前、コールドプルームは単一の巨大なコールドプルーム＝スーパーコールドプルームになったと考えられています。すべての上部マンツルはスーパーコールドプルームに向かって移動するようになりました。

マンツルに沈み込むことのない大陸地殻は全てスーパーコールドプルームに向かって移動することで衝突・合体が進み、最終的に単一の巨大な大陸＝超大陸が形作られました。19億年前に地球史上最初の超大陸であるヌーナ超大陸が出来たと考えられています。

超大陸形成のクライマックスになると、超大陸周辺の海溝部からマンツルに沈み込んだメガリスが一斉に核に向かって崩落します。その結果、全地球規模でマンツルオーバーターンが起き、マンツル対流が2層から1層に変化します。

全地球規模でマンツルオーバーターンが起きて上部マンツルに高温の下部マンツルが上昇することで、上部マンツルが高温化すると同時に、減圧された下部マンツルは熔融して大量のマグマを作り出します。地表面環境は高温化すると同時に激しい火成活動が起こります。

超大陸の周囲でメガリスが一斉に崩落すると、超大陸の下には高温の下部マンツルの巨大な上昇流＝スーパーホットプルームが出来ます。

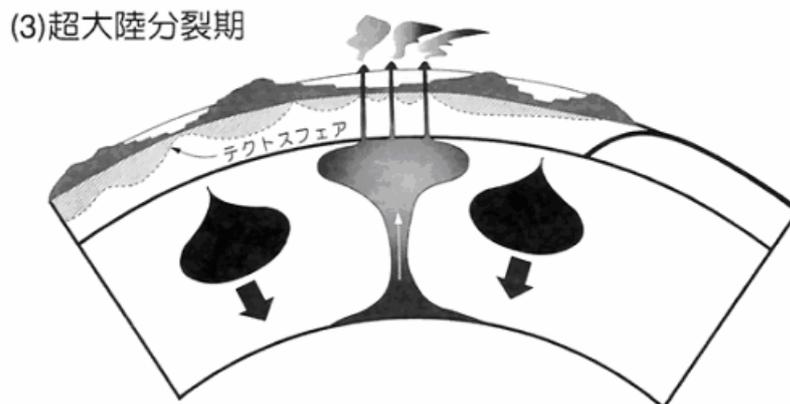


図1-9 超大陸の分裂とスーパーホットプルームの誕生

高温のスーパーホットプルームは、大陸地殻を熱侵食し、爆発的な火山活動を起こし、超大陸を引き裂き分裂させます。スーパーホットプルームの上では新しい海洋プレートが活発に生産され、海洋地殻が拡張します。こうして超大陸を構成していた大陸地殻は再び分裂して海洋プレートの拡張・縮退に載って移動し始めます。

時間の経過に伴ってマンツルの冷却が進むと火成活動は低下し、海洋プレートの生産性も低下します。地表面環境の温度は下がり、コールドプルームの数が減少して大型化します。

数億年が経過すると再び単一のスーパーコールドプルームが生まれ、すべての大陸地殻はスーパーコールドプルームに向かって移動を開始し、再び超大陸が形成されます。

この超大陸形成の周期的な変動をウィルソンサイクルと呼びます。19億年前に最初の超大陸であるヌーナ超大陸が出現して以降、現在までにロディニア超大陸（10億年前）、ゴンドワナ超大陸（5.5億年前）、パンゲア超大陸（3億年前）が出来たと考えられています。15億年前にも超大陸があったとする説もあります。現在もウィルソンサイクルは続いています。

### 1-3 固体地球の変動と地表面環境の変化

#### (1) 冷却を続ける地球

地球は、ほとんど真空の宇宙空間に浮かんでいるため、物質的にはほとんど孤立しており物質的な出入りはありません。つまり物質についてはほとんど閉鎖系であり、保存系と考えて差し支えありません。

しかし、エネルギーについては違います。小惑星衝突によって誕生した地球は、内部に小惑星衝突のエネルギーを熱エネルギーとして蓄えていましたが、表面温度に応じた赤外線放射によって宇宙空間に熱エネルギーを放出して次第に冷却しています。エネルギーについては開放系なのです。

厳密には放熱するだけでなく、主星である太陽から可視光線を中心とする放射エネルギーを吸収しています。

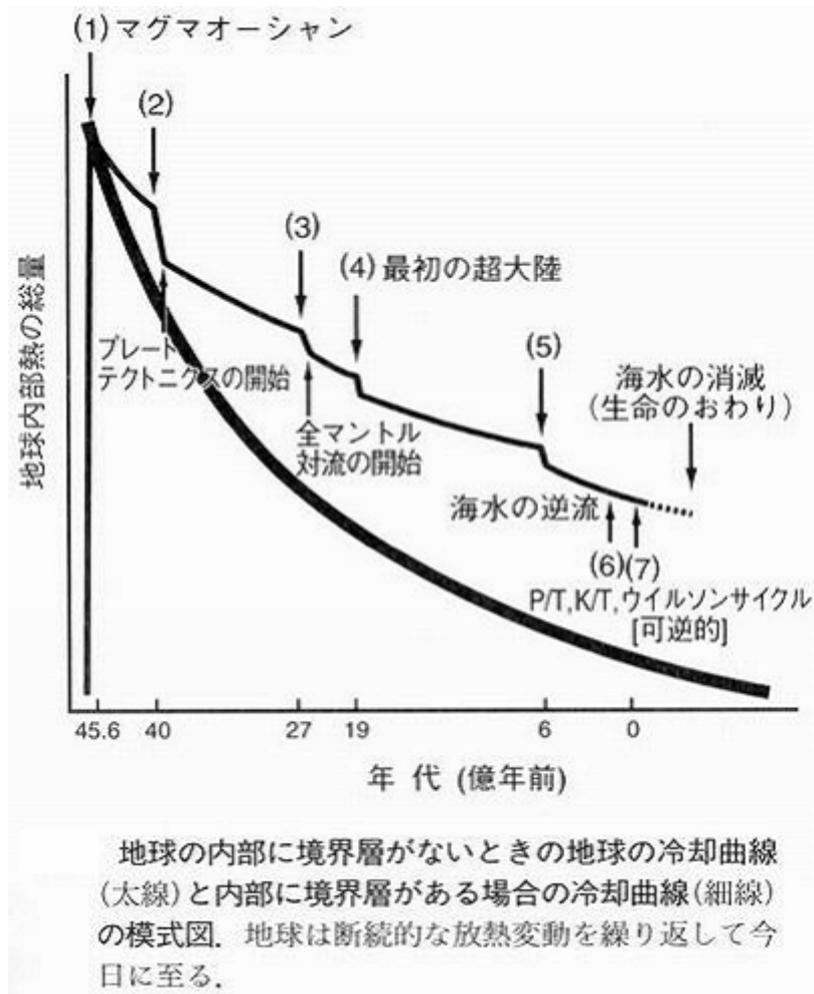


図 1-10 不連続な地球の冷却曲線

もし固体地球が均質な物体であれば、冷却曲線は指数関数的な滑らかな曲線になるはずで

す。これまで見てきたように地球には中心から金属鉄の内核、液体鉄の外核、下部マントル、

上部マントル、地殻、海洋、大気という質的に異なる多段階の階層があります。その結果、熱の放出は一樣ではなく、図に示すように不連続な曲線になります。

物質の表面温度と放射エネルギーとの間の関係は近似的に黒体に対するステファンボルツマンの式で推定することが出来ます。放射エネルギーの強さを  $I(\text{W}/\text{m}^2)$ 、物体の表面温度を  $T(\text{K})$ 、ステファンボルツマン定数を  $\sigma$  として次の様に表されます。

$$I = \sigma \cdot T^4 \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

したがって、放射エネルギーの強さ＝冷却曲線の勾配の絶対値なので、急激に冷却が進むときは地球の表面温度が高いことに対応します。

ただし、地球には大気があるため、固体地球の表面温度＝気温とステファンボルツマンの式で求められる放射平衡温度は単純に対応するわけではありません。

図中の(2)は原始海洋の誕生に対応する放熱量の急増に対応しています。海洋の誕生で原始大気の大気圧が 300～400 気圧から 10 数気圧にまで低下し、大気が薄く透明になったことによって、大気による保温効果が小さくなり、固体地球からの放熱量が急増したと考えられます。海洋が出来た後の大気圧・組成の変化は緩やかです。

原始海洋が誕生したときを除くと、地球の放熱が急速に進む時は地表面環境の温度が急上昇することを意味します。これまで見てきたように、固体地球表面の温度が急上昇するときは、マントルオーバーターンがおきて火成活動も活発になります。

地球が急速に冷却される時期には急激な気温上昇と激しい火成活動が同時に起こり、地表面環境がカタストロフィックに激変することになります。

図中に記した番号は、丸山茂徳氏らによる地球史的に見た環境の激変のもたらす 7 大重大事件です。重大な環境変化が地球の放熱量が急増する時期＝地表面環境が急激に温暖化して激しい火成活動が起こった時期と同期していることが分かります。

## (2) ウィルソンサイクルと氷河期

既に見てきたように、超大陸の形成・分裂の周期的変動であるウィルソンサイクルと地球の表面温度＝気温の間には強い相関関係があります。

超大陸形成のクライマックスには超大陸周囲のメガリスの一斉崩落で全地球的な規模でマントルオーバーターンが発生してマントル対流が 2 層から 1 層に変化します。上部マントルの温度が急上昇して地表面環境が高温化します。

更に超大陸分裂初期にはスーパーホットプルームの上昇による激しい火成活動が起こり、超大陸を分裂させ、海洋地殻が活発に作られます。同時に造山運動も活発になり新たな大陸地殻が作り出されます。

時間の経過とともに上部マントルは冷却され、火成活動も弱まり海洋地殻の生産速度が小さくなります。上部マントルから地表面環境への放熱量が減少し、地表面環境の温度が低下します。

マントル内ではコールドプルームの数の減少と大型化が進み、最終的に単一のスーパーコ

ールドプルームに向かってすべての大陸地殻が移動を始めます。

したがって、超大陸形成のクライマックスから分裂初期の地表面環境は高温化します。その後次第に地表面環境の温度は低下します。スーパーコールドプルームが形成される超大陸形成初期から超大陸形成のクライマックスのメガリス崩落直前には地表面環境の温度は極小になります。

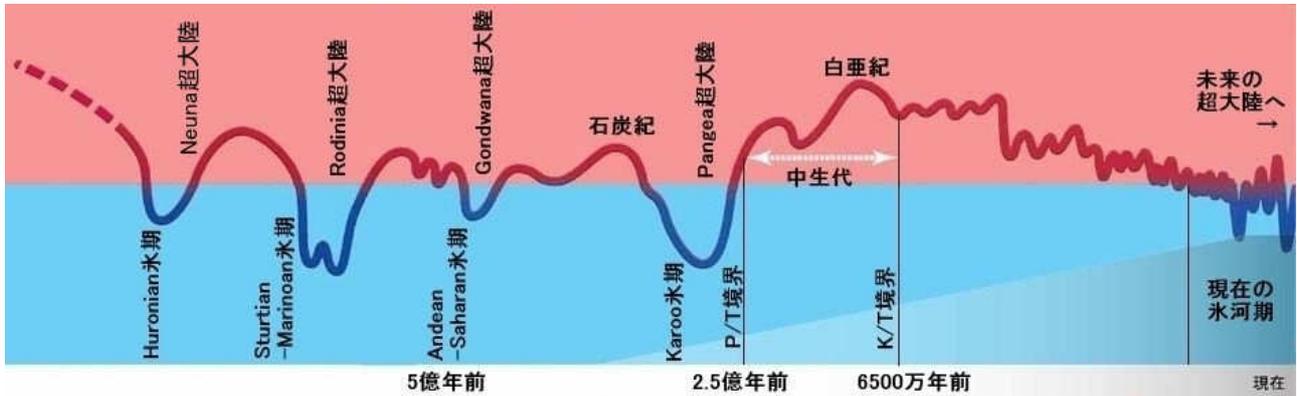


図 1-11 地球の気温変動

図に示す地表面環境の温度≒気温を示す曲線が水色の範囲にある時期は、極冠あるいは高山に万年氷が存在する「氷河期」であることを示しています。氷河期の期間と超大陸の誕生が同期していることが分かります。

- Huronian 氷期 Neuna 超大陸 (24～21 億年前)
- Sturtian－Marinoan 氷期 Rodinia 超大陸 (7.5～6.4 億年前)
- Andean－Saharan 氷期 Gondwana 超大陸 (4.6～4.3 億年前)
- Karoo 氷期 Pangea 超大陸 (3.6～2.5 億年前)
- 現在の氷期 Amasia 超大陸 (2 億年後?) (300 万年前～ )

超大陸分裂初期の地表面環境の温度と氷河期の地表面環境の温度の差は 10～20℃程度にも及びます。

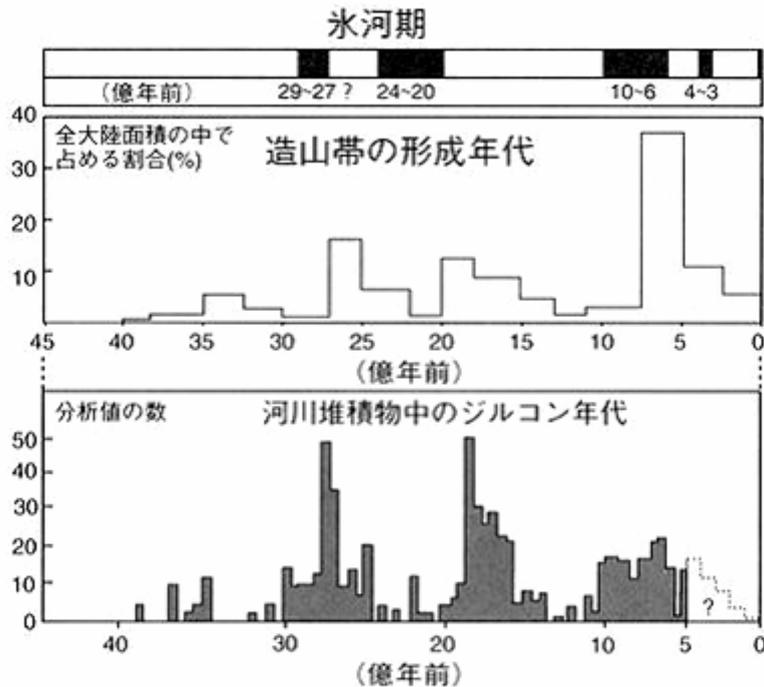
直近の超大陸パンゲアが分裂を始め、中生代白亜紀に気温極大期を迎えた後、6500 万年前に新生代に入って地表面環境の温度は低下を続けています。3000 万年ほど前には南極大陸の氷床が出来始めました。現在は確認されている地球史上 5 回目の氷河期の只中にあります。

上部マントルからの放熱量は、海洋プレートの生産速度あるいは水平方向の移動量の大きさに依存します。

超大陸の形成の後期、単一のスーパーコールドプルームに向かって大陸地殻が移動するよ

うになると次第に上部マントルは冷却され流動性が低下し、海洋プレートの移動速度は遅くなります。

海洋プレートの沈み込み帯における付加体による造山運動の速さは海洋プレートの移動量に依存します。したがって、付加体による造山運動の痕跡から、海洋プレートの移動速度の変化を類推することが出来ます。



氷河期の歴史(上)、付加型造山帯の形成年代頻度分布(中)、および主要な大河の河口から採取された川砂のジルコンの鉛同位体年代の頻度分布図(下)<sup>(9)</sup>。ジルコンは広域変成作用や変成流体による再結晶作用にきわめて強い抵抗性をもつために、もとの火成年代を保持していることが多い。

図 1-12 氷河期と造山帯

図は、氷河期の期間と付加体による造山帯の形成年代、火成活動の指標となるジルコンの鉛同位体年代を比べています。

図から、30~27 億年前、22~20 億年前、13~7 億年前の時期には付加型造山帯の生産量が著しく低下していたことが分かります。

### (3) 全球凍結と海水のマントルへの逆流

Rodinia 超大陸があった頃の Sturtian-Marinoan 氷期の 7 億年ほど前には、赤道付近のごく一部を除いて地球表面のほとんどすべてが氷河に閉ざされたと考えられています。これを「全球凍結」とか「スノーボールアース」と呼んでいます。

この時期、上部マントルの温度はかつてないほどに低下して、流動性が低くなり、プレートの生産速度も極小になったと考えられます。地球内部から宇宙空間への放熱量が減り、地表環境が極端に低温化したのです。

Sturtian–Marinoan 氷期の全球凍結からどのように気温が回復したのかについて、ネット上には様々な主張が述べられています。

例えば、Wikipedia では、大気中の二酸化炭素  $\text{CO}_2$  濃度の上昇による温室効果によって気温が上昇したことを原因の一つとして挙げています。

前述の通り、温室効果とは、地表面環境を暖める主要な熱源が太陽放射である場合において、太陽光を透過して、地表面放射を吸収する大気の性質を指すものです。

太陽放射がほとんど現在と変わらないものとして  $1366\text{W}/\text{m}^2$ 、氷のアルベド（反射率）を 90%程度として放射平衡温度を求めてみます。

$$\text{有効放射量 } I = \frac{1366\text{W}/\text{m}^2 \times (100 - 90)\%}{4} = 34.15\text{W}/\text{m}^2$$

ステファンボルツマンの式から、

$$T = \sqrt[4]{\frac{I}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{34.15\text{W}/\text{m}^2}{5.67 \times 10^{-8}}} = 156.7\text{K} = -116.3^\circ\text{C}$$

現在の地球の放射平衡温度は  $-18^\circ\text{C}$ 程度で温室効果によって  $33^\circ\text{C}$ 上昇して平均気温は  $15^\circ\text{C}$ 程度です。

当時の大気圧、大気の温度減率を現在と同程度と仮定し温室効果による昇温を  $33^\circ\text{C}$ 程度とすると放射平衡温度が  $-116.3^\circ\text{C}$ では、平均気温は  $-83^\circ\text{C}$ 程度であり、氷を解かすことは出来ません。

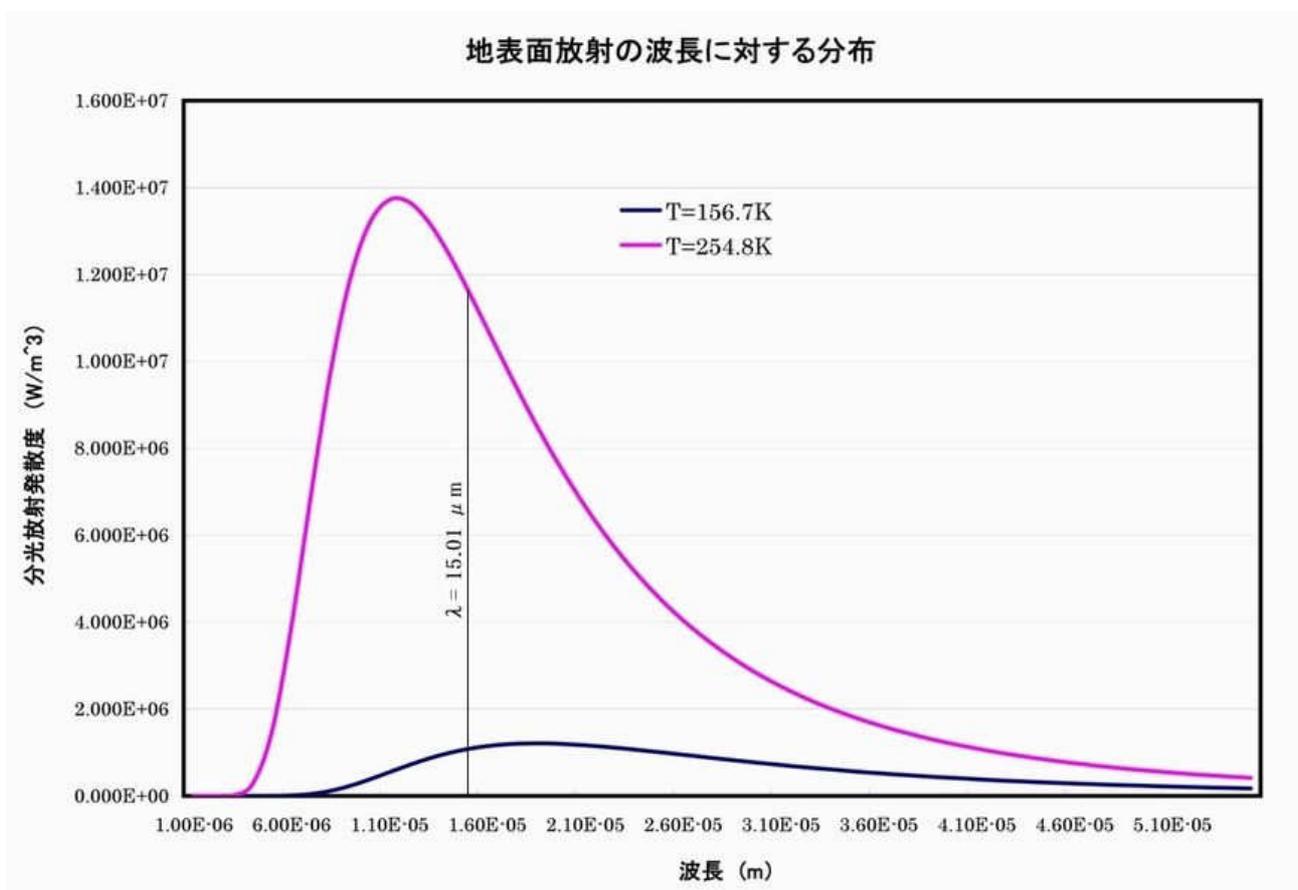


図 1-13 地表面放射スペクトル

もう少し詳しく検討してみます。全球が凍結するような寒冷な気温状況では、地球大気の主要な赤外活性気体（いわゆる温室効果ガス）である水蒸気の濃度は極度に低下します。これは現在の南極を想像すればよいでしょう。このような環境では、地球の表面放射がほとんど大気に吸収されないまま、直接宇宙空間に放熱されます。極端な「放射冷却現象」です。したがって、気温は限りなく $-116.3^{\circ}\text{C}$ に近かったと考えられます。

地表面放射に対する  $\text{CO}_2$  の主要な吸収波長は  $15.01\mu\text{m}$  です。

図 1-13 に  $156.7\text{K}$  と  $254.8\text{K}$  の地表面放射のスペクトルを示します。図に示すように、波長  $15.01\mu\text{m}$  における現在の地球の放射平衡温度  $254.8\text{K}$  に対する地表面放射（分光放射発散度）は  $1.16 \times 10^7 (\text{W}/\text{m}^3)$  程度です。これに対して Sturtian-Marinoan 氷期当時の  $156.7\text{K}$  に対する地表面放射は  $1.08 \times 10^6 (\text{W}/\text{m}^3)$  程度です。

したがって、 $\text{CO}_2$  による地表面放射からの吸収エネルギー量は現在の  $1/10$  以下でしかありません。多少  $\text{CO}_2$  濃度の上昇があってもその効果は無視できる程度であったと考えられます。

全球凍結からの気温回復は地球の内部熱の放出が回復したことが原因なのです。

7 億年前の全球凍結と前後して、地球史的にもう一つ重大な変化が起こりました。

原始海洋が出来て以後、海水の量は図(c)に見られるように増加し続けていました。これは地球内部にあった水が、マンツルのホットプルームによる火成活動に伴って、地球表面に運ばれたためです。

中央海嶺で海洋プレートが作られるときに一旦は含水鉱物として海洋地殻に固定された水も、海溝部からマンツル中に沈み込む過程で、高温のマンツルの影響で脱水されたため、海水がマンツルに還流することはありませんでした。

7 億年ほど前になるとマンツルの冷却が進み、マンツルの粘性が大きくなり海洋プレートの生産・移動速度が低下しました。地表面に対する熱の供給が低下して全球凍結を起こしました。

その一方で、含水鉱物で出来た海洋地殻は脱水されないまま上部マンツルにまで沈み込むことになり、海水がマンツルに逆流するようになりました。

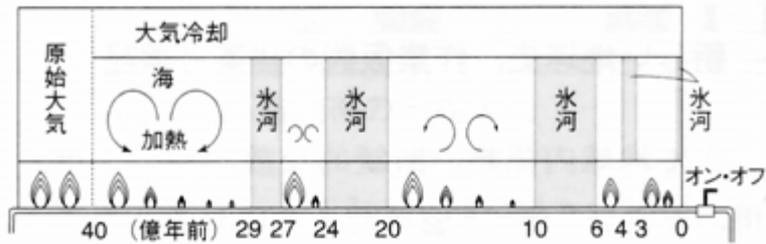
マンツルに海水が吸収されるようになると、マンツルの融点が下がると同時に粘性が小さくなりました。

図 1-14(b) の上部マンツルの温度の変化を見ると、27 億年前と 20 億年前に急激に温度が上昇しています。これはメガリスの崩落によるマンツルオーバーターンが発生したことを示しています。その後、陸地面積が急増しているのは活発な火成活動を伴う造山運動が活発であったことを示しています。

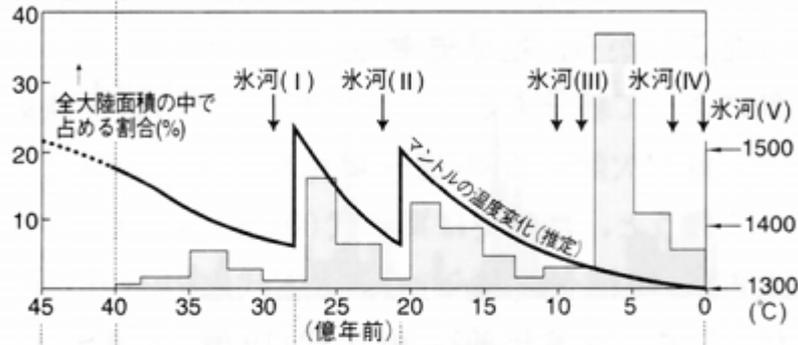
ところが、Rodinia 超大陸のできた 7 億年前には上部マンツルの温度が急上昇することはありませんでした。これは、マンツルオーバーターンが起きなかったことを示しています。

しかし、その後の火成活動は活発であり、陸地面積が急激に多くなっています。これは、海水がマンツルに逆流したことによる融点温度の低下と粘性低下による活発な火成活動が起こったことを示唆しています。同時に、海水位の低下によって浅海の平坦部が一気に陸地化することで陸地面積が急増したことを示しています。

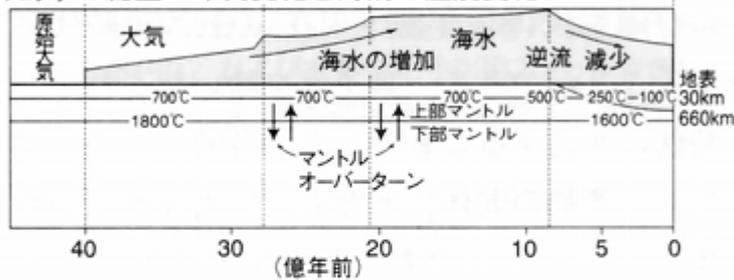
(a) 表層環境



(b) 造山帯の形成年代と上部マントルの温度変化



(c) 海水の総量の年代変化と海溝の温度変化



地球表層環境の歴史とプレート運動の盛衰(付加型造山帯の形成年代), 上部マントルの温度変化および海水の総量と沈み込み帯の温度の歴史。(a)海洋は中央海嶺やブルーム火山活動によって底から定期的に加熱される。いっぽう、上空からは定期的に冷却されている。加熱が弱まると海水温度が低下して氷河ができる。海水の加熱の強弱を風呂のガス加熱にたとえ、加熱の強さを炎の大小で表現。(b)造山帯の形成年代の頻度分布とプレート運動の強弱, および上部マントルのポテンシャル温度の時代変化の推定(太古代, 原生代のマントルの温度低下の証拠はまだ得られていない), (c)地表を覆った海水の総量の時代変化。7.5億年前までは地球内部に貯えられた水はブルームによって地表へと運ばれた。ところが地表水はマントルに運ばれることがなかったために海水の量は一方的に増加した。7.5億年前に逆流が始まった。プレート沈み込み帯の温度は、そのときから急速に低下した。

図 1-14 造山帯の形成と海水の逆流

**Rodinia** 超大陸の下にスーパーホットプルームが発生し、融点の下がったマントルは激しい火成活動を起こすと同時に海洋地殻の生産速度が上がりマントルからの放熱量が増加し、スノーボールアースは解消されました。そして **Rodinia** 超大陸は急速に分裂を開始しました。

**Neuna** 超大陸が分裂してから **Rodinia** 超大陸が出来るまでに 10 億年以上を要したのに比較して、**Rodinia** 超大陸が分裂してから **Gondwana** 超大陸が出来るまではわずか 2 億年足らずであったことから、この時期のマントルの流動性が大きくプレートの移動速度が速かったことを示しています。

7 億年前に始まった海水のマントルへの逆流は現在も続いています。これまで水深にして 600m ほどの海水がマントルに吸収されたと推定されています。いずれ全ての海水が固体地球に吸収されてしまうことになり、その時が地球の生態系の終焉・生命の終わりだと予測されています。

#### (4) 固体地球と生態系の進化

これまで固体地球の変動について概観してきました。ここでは固体地球の変化と生態系の相互進化について概観することにします。

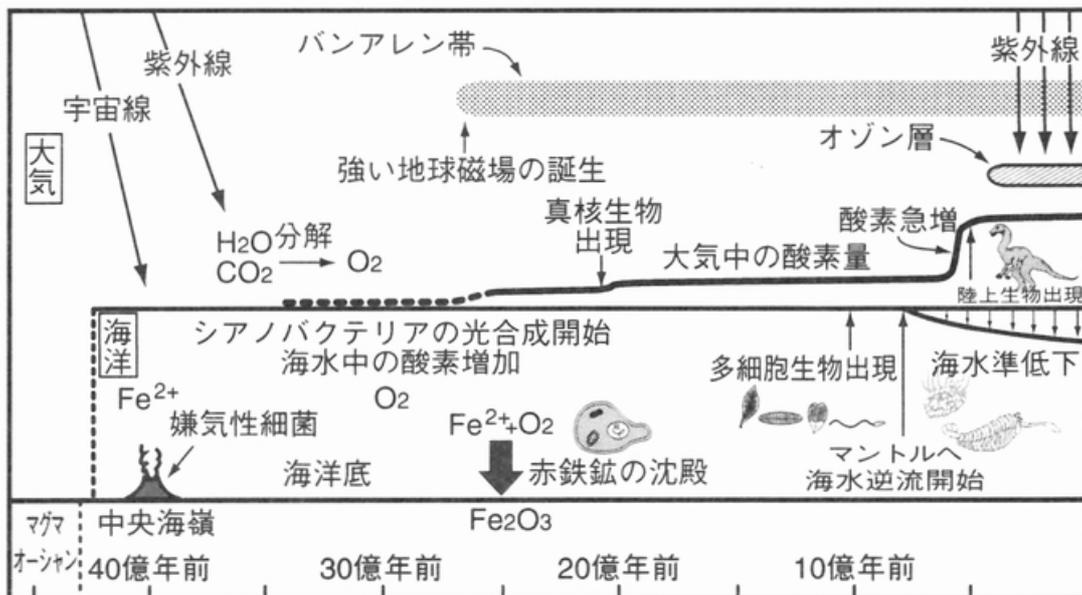


図 1-15 固体地球と生態系

地球最初の生物は、40 億年前に原始海洋が出来た後に、有害な宇宙線や紫外線の届かない中央海嶺の熱水噴出孔付近で生まれたバクテリアだと考えられています。まだ確定的な決着はついていないようです。

27 億年前に地球環境に大きな変化がありました。上下マントルの境界に蓄積されていた海洋プレートの残骸であるメガリスが外核に崩落したことで、マントルオーバーターンが起き地表面環境が急激に高温化すると同時に、液体鉄の外核に異常な低温部が生じたことで液体鉄の対流が起こり強い地球磁場が生まれました。

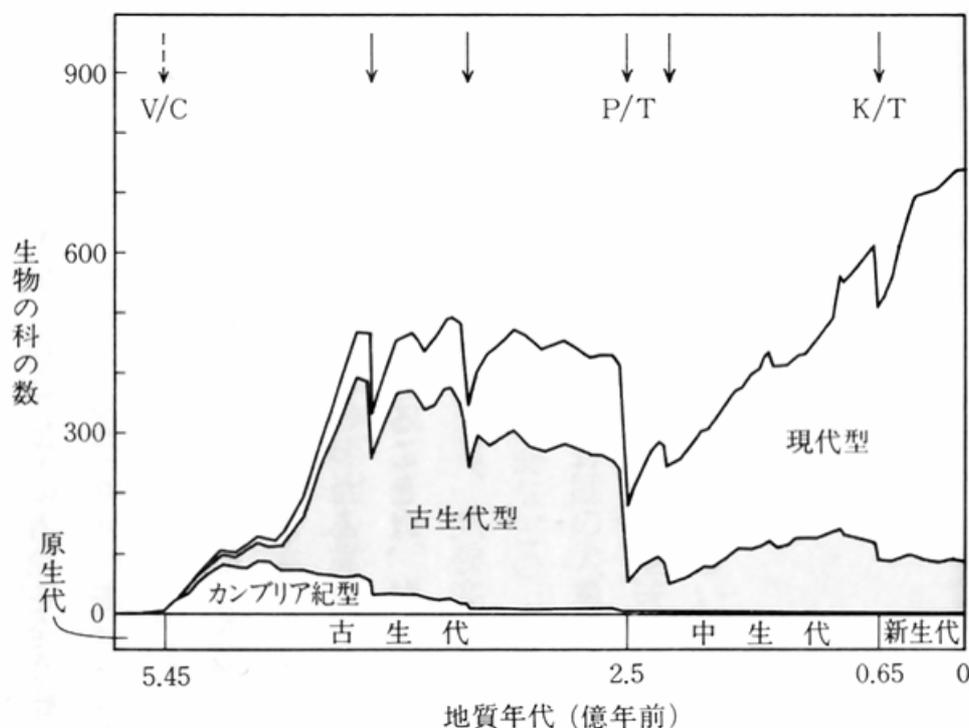
これによって、有害宇宙線がバンアレン帯で捉えられるようになり、ほとんど地球の表面環境に届かなくなりました。その結果、地球生物は深海からより浅い海に進出することが出来るようになりました。そして、浅海に進出したバクテリアの中に光合成をおこなうシアノバクテリアが生まれました。

シアノバクテリアが生まれる前の海水は還元的な環境であり、鉄がイオンの形で存在していました。シアノバクテリアの登場で鉄イオンは酸化されて海底に沈殿しました。海底に堆積した酸化鉄は、付加体として大陸地殻に移動し、これが縞状鉄鉱層となり、現在の文明を支えています。

やがて海水は酸素で飽和し、余分の酸素が大気中に放出されるようになりました。大気中の酸素濃度が急激に上昇し、オゾン層が出来ました。オゾン層によって、生物にとって有害な紫外線はほとんど地表面まで届かなくなりました。

こうして陸上に生物が進出する準備が整ったのは古生代オルドビス期（約 4 億 8830 万年前から約 4 億 4370 万年前まで）頃であったと考えられています。

ともすると、環境保護の謳い文句として「美しい地球、緑の地球」という詩的な表現が使われることがあります。しかし、実際には地球の 46 億年の歴史において、陸上に植物を一次生産者とする生態系が生まれたのは最近のわずか 5 億年足らずの期間であることが分かります。それまでの陸地は荒涼とした岩石砂漠が広がっていたと考えられます。



顕生代(5.5 億年前～現在)における生物の消長(↓は主な大量絶滅事件、セブコスキーによる)

図 1-16 地球の変化と大量絶滅

しかも、この 5 億年の間には何度も生物の大絶滅を引き起こす環境の大激変があったことを考慮すると、「美しい地球、緑の地球」である期間は更に短くなります。

地球の生態系は固体地球の進化とともに相互に影響しながら普遍的に変化し続けています。現在の人間を含む生態系の形が唯一絶対なものではなく、固体地球の変動を受けて受動的に常に変化していることを認識することが必要です。

地球環境の変化は概して過酷なものであり、時に大量絶滅を引き起こすような激的な変化を伴います。地球の環境変化を考えると、人類社会あるいは現在の地球環境を地球史的に相対化して見る必要があります。

地球の環境の激変によって、地球の生態系は生物の大量絶滅を何度も経験しています。図 1-16 に示すように、陸上生態系が誕生して以降でも 5 回の大量絶滅が起きていることが分かっています。

最も有名な大量絶滅は、生態系の頂点に君臨していた巨大な恐竜が絶滅した白亜紀と古第三紀との境界で起きた K/T 境界線の大量絶滅でしょう。しかし、これは大絶滅の規模としては特に大きなものではなかったとされています。

陸上生態系を含む最も大規模な大量絶滅はペルム紀と三畳紀の境界で起きた P/T 境界線の大量絶滅と考えられています。

さらに、最近の研究では、陸上生態系が成立する以前の原生代とカンブリア紀の境界において起きた V/C 境界線の大量絶滅も地球史的に重大なものであったと考えられています。

V/C 境界線の大量絶滅では、原生代の長期間にわたって進化してきたエディアカラ生物群が絶滅したと考えられています。

V/C 境界線の大量絶滅後、カンブリア紀に入ると活発な適応放散が起こり、「カンブリア爆発」と呼ばれている種の激増が起こりました。

大量絶滅が起こる度に優勢種が入れ替わるだけでなく種の多様化が加速されてきました。

大量絶滅の原因となる環境変化は単一ではありません。

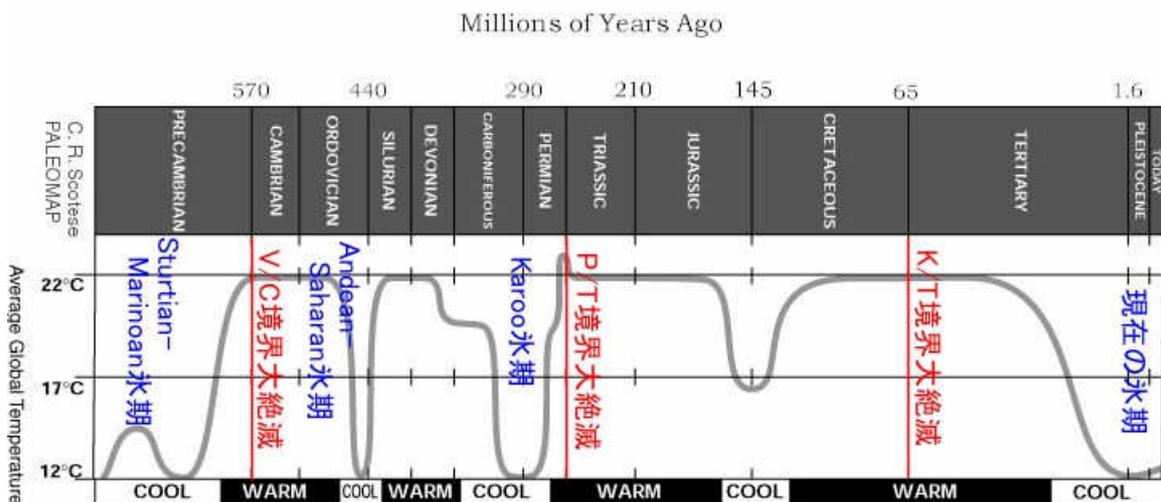


図 1-17 地球の気温変動

図 1-17 は、Sturtian-Marinoan 氷期から現在までの気温変動の概要を示しています。この間の氷河期と主要な大量絶滅の起こった時期を示しています。

V/C 境界線と P/T 境界線には類似の気温変動が見られます。いずれも、超大陸の形成がクライマックスを迎えて地表面環境の気温低下が起こり氷河期となり、引き続きスーパーホットプルームによる激しい火成活動によってマントルからの熱放出が大きくなり気温が急上昇すると同時に超大陸の分裂が始まった時期と大量絶滅が同期しています。

爆発的な激しい火成活動による溶岩や火山灰の噴出、気温上昇による環境の激変による生態系の破壊が起こりました。

パンゲア超大陸の分裂時に起きた P/T 境界線の大量絶滅では「スーパーアノキシア」と呼ばれる海水の酸素濃度が著しく低下する現象が 2000 万年間にわたってみられました。これは、火山噴出物が成層圏にまで達して長期間太陽光を遮蔽したことによって、生態系の第一生産者である光合成生物が死滅し、酸素供給が断たれたことなどが原因と考えられます。

このように、超大陸の分裂初期には大量絶滅を伴う環境の大激変が起こることになります。

特異なのは K/T 境界線の大絶滅です。恐竜を絶滅させたこの事件は、その原因が地球系外から飛来した巨大隕石（小惑星）の衝突によってもたらされたものです。

北米大陸のユカタン半島付近に直径 10km 以上の巨大な隕石が衝突し、莫大な運動エネルギーが解放されました。巨大な津波や衝撃波が生じ、隕石自身や大陸地殻が溶融・蒸発したと考えられます。成層圏にまで舞い上がった粒子状物質によって、太陽光が遮蔽され、光合成生物が死滅したと考えられます。

これ以外にも、全球凍結をもたらすような氷河期も大量絶滅の原因の一つです。

直近の未来では、2 億年ほど先に現在のアジア大陸を核とする超大陸「アメイシア」が分裂を開始するときに大量絶滅が起きるのかもしれませんが。

長期的には海水のマントルへの吸収、あるいは太陽の巨大化によって、すべての地球生物は絶滅することになる運命は避けようがありません。

しかし、地球に海洋が生まれて以降、地球の生物は何度も大量絶滅を経験しながら、進化し、多様化を続けています。環境保護を訴えるスローガンとして「ガラスの地球を守れ！」という情緒的な表現をよく耳にします。しかし、実際の地球の生態系はそれほど不安定で脆弱なものではありません。今後も大絶滅を経験しながら、したたかに進化を続けるはずで

す。勿論、だからと言って、人間にとって快適な自然環境を浅はかな短期的な政治・経済的な理由で不用意に破壊することは愚かなことです。

同様に、自然科学的に誤った情緒的・近視眼的な温暖化解釈によって、誤った対策を行うこともまたそれ以上に愚かなことです。

## (5) 地球大気の進化

固体地球と生物の進化とともに、地球大気も進化し続けています。原始地球大気は水蒸気 H<sub>2</sub>O を主とする 300 気圧以上の分厚い大気で覆われていました。

40 億年ほど前に原始海洋が出来た頃には大部分の水蒸気は海水となり、同時に大気中の二酸化炭素 CO<sub>2</sub> は海水に溶解込み炭酸カルシウムとなり固定されました。

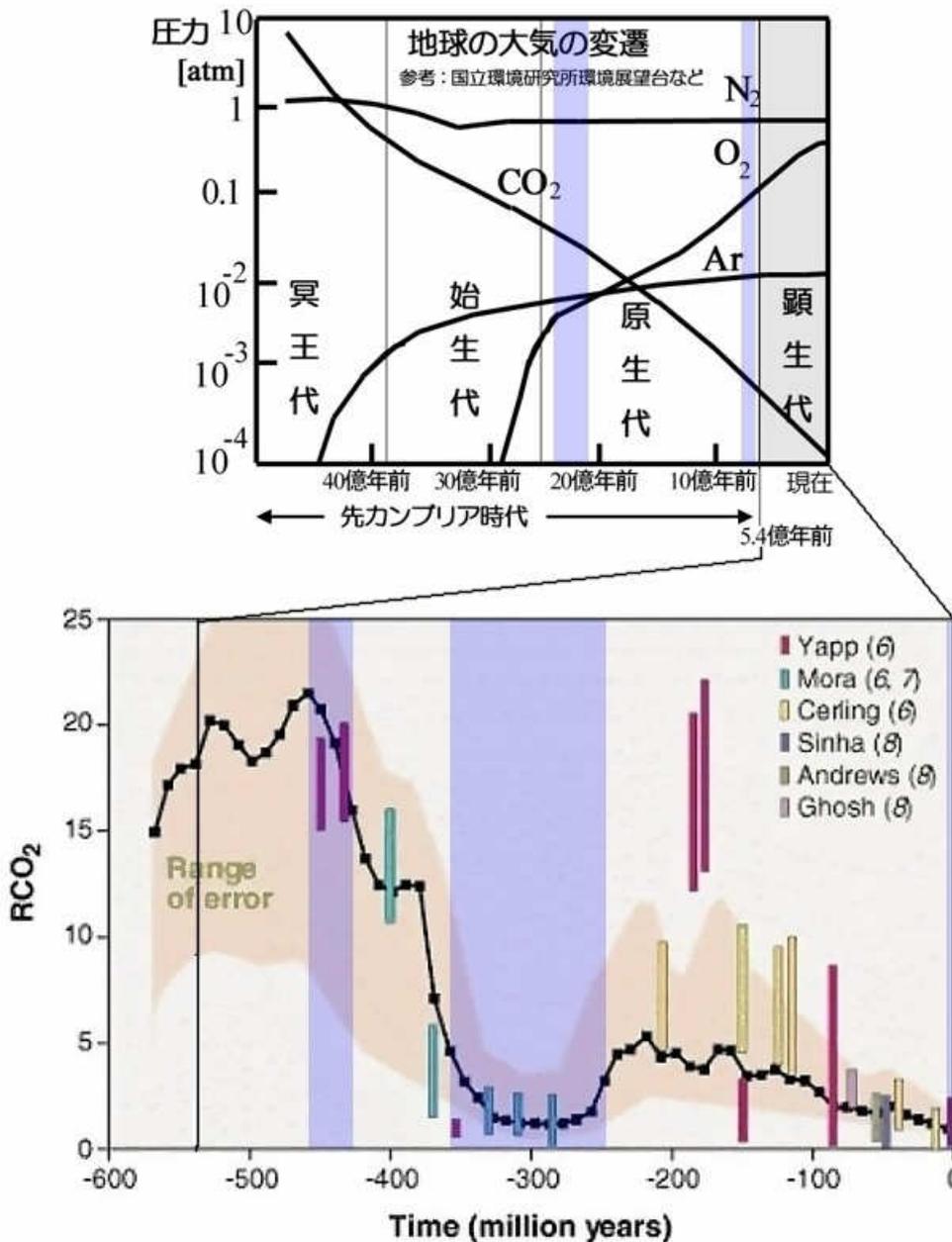


図 地球のCO<sub>2</sub>濃度の推計。縦軸(RCO<sub>2</sub>)は、280ppmに対する比。横軸の単位は100万年。恐竜が繁栄していた1億年前頃(図中のマイナス100前後)のCO<sub>2</sub>濃度は現在の数倍あった。

[http://earthguide.ucsd.edu/virtualmuseum/climatechange2/07\\_1.shtml](http://earthguide.ucsd.edu/virtualmuseum/climatechange2/07_1.shtml)

図 1-18 大気組成の変遷

図 1-18 上段の図によると、40 億年前には窒素 N<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> を主成分とする大気圧は現在とほぼ同じ 1 気圧を少し超える程度にまで薄く透明になったと考えられます。その後も CO<sub>2</sub> は海洋に吸収されて減少しています。

一方、アルゴン Ar は増加し続けています。これは、カリウム K の放射性同位体カリウム 40 (半減期 12.5 億年) の放射性崩壊によって生成した Ar が大気中に放出されているためです。

原始地球大気にはほとんど酸素  $O_2$  は含まれていませんでした。浅海で光合成をおこなう生物であるシアノバクテリアの登場で  $CO_2$  と  $H_2O$  から糖を合成する過程で副産物として  $O_2$  が生成されるようになりました。海水中の鉄イオンを酸化し尽くし、海水に飽和した  $O_2$  が大気に放出されることで次第に大気中の  $O_2$  が増えました。

大気中に  $O_2$  が増え、成層圏において紫外線によってオゾン層が形成され、有害紫外線が地表に届かなくなったことで5億年ほど前に生物が陸上に進出しました。

陸上に光合成生物が生まれると、 $O_2$  の増加速度はさらに加速しました。その一方で  $CO_2$  量の減少速度も加速しました。特に、古生代石炭紀(3億5920万年前から2億9900万年前)の頃は、湿潤温暖な気候で巨大シダの森林が繁茂し、これが分解されずに石炭として固定されたため、大気中の  $CO_2$  は急激に減少する一方で  $O_2$  が急増することになりました。図1-18下段の図の4~3億年前の  $CO_2$  の激減がこれに当たります。

この時期、大気中の  $O_2$  濃度は35%に達したと考えられています。この酸素の増加が生物の巨大化の一因だと考えられています。

大気中の  $CO_2$  濃度は地球誕生以降、大局的に見ると単調に減少しています。図1-18下段の図は280ppmを1として、その比率で  $CO_2$  濃度を示しています。図から、顕生代の初め(5億4000万年前)の  $CO_2$  濃度は現在の15倍程度であったことが分かります。

過去の氷河期の原因について、大気中の  $CO_2$  濃度の低下によって温室効果が弱まったからである、という説明を見ることがあります。あるいは、全球凍結からの気温回復の一因として、火成活動によって大気中  $CO_2$  濃度が増加したから、という説明を見ることがあります。

しかし、この説明には無理があると考えます。

そもそも、地球放射の範囲では、主要な温室効果ガスは水蒸気  $H_2O$  であり、その影響は圧倒的に大きく、 $CO_2$  の効果は高々5%に満たないものです。

あるいはここで見てきた地球史的な視点からは、地球の5回の氷河期(図に青く示した時期)を比較すると、現在の氷河期とKaroo氷期(3.6~2.5億年前)は同程度の  $CO_2$  濃度ですが、これ以外の3回の氷河期の  $CO_2$  濃度は少なくとも現在の15倍以上です。

これを見る限り、大気中の  $CO_2$  濃度と気温変動には明確な相関関係はないようです。したがって原始海洋が誕生して以後、大気中の  $CO_2$  濃度は地球の大局的な気温変動を引き起こす主要な要素ではないと考えるのが合理的です。

## 1-4 地球史の中の現在の地球

これまで地球の誕生から 46 億年間の固体地球の変動、それに伴う地表面環境の変化、生物進化についての概要を見てきました。

その結果、気温変化を含めて地球の表面環境・生態系の変化に対して最も大きな影響を与えているのは、当然ですが、固体地球自身の変動であることが分かりました。

ここでは、46 億年間に及ぶ地球史の中で現在の地球がどのような位置にあるのかを、少し詳しく見ておくことにします。

### (1) ウィルソンサイクルの現在

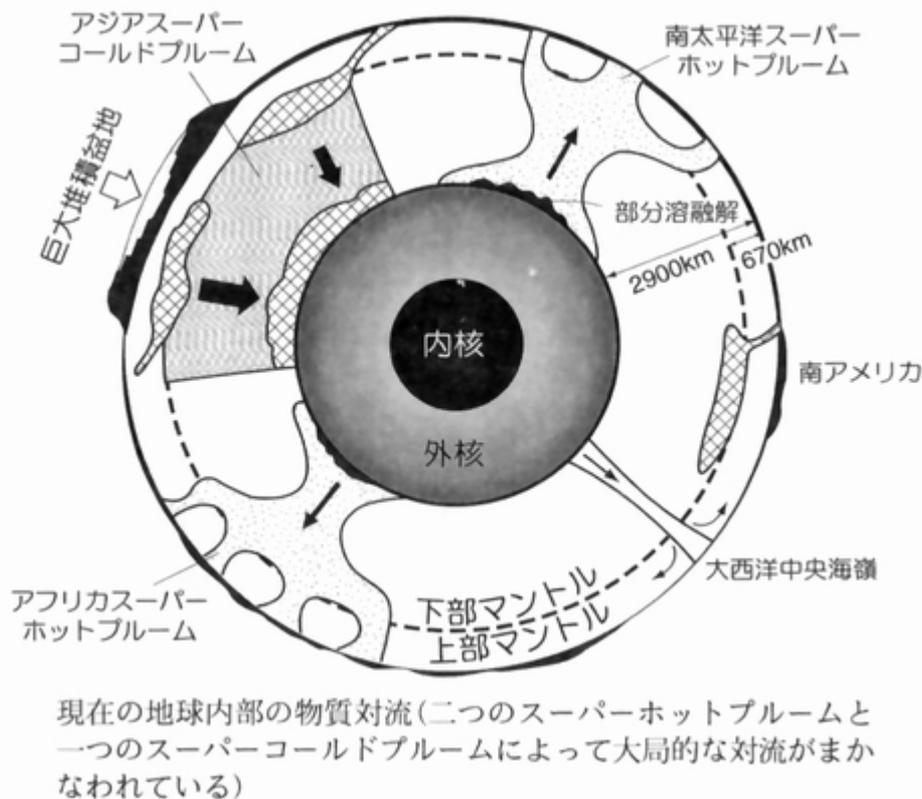


図 1-19 現在の地球の内部構造

直近の超大陸であったパンゲアが分裂を始めて 2 億年余りが経過しています。次にどのような超大陸が形成されるのかについては、4 つほどのシナリオがあるようです。ここでは、丸山茂徳によるシナリオを紹介します。

パンゲアが分裂を開始した後、中生代白亜紀にアジア東部の下に集積したメガリスがマントルへ崩落して部分的なマントルオーバーターンが起き、地表面環境が温暖化しました。

この「白亜紀のパルス」を契機に、アジア大陸の下にスーパーコールドプルームが生まれたと考えられています。

図に示すように、南太平洋とアフリカにスーパーホットプルームがあり、上部マントルは

全てアジアスーパーコールドプルームに向かって移動していると考えられています。

現在の大西洋は大西洋中央海嶺を中心に東西に広がり、一方太平洋は縮小し、南北アメリカ大陸はやがてアジア大陸に衝突することになります。

オーストラリア大陸、アフリカ大陸は北上してインド・アジア大陸と衝突することになります。

こうして2.5～3億年先に超大陸アメイシア (Amasia) が誕生すると考えられています。

## (2) 現在の地球の気温

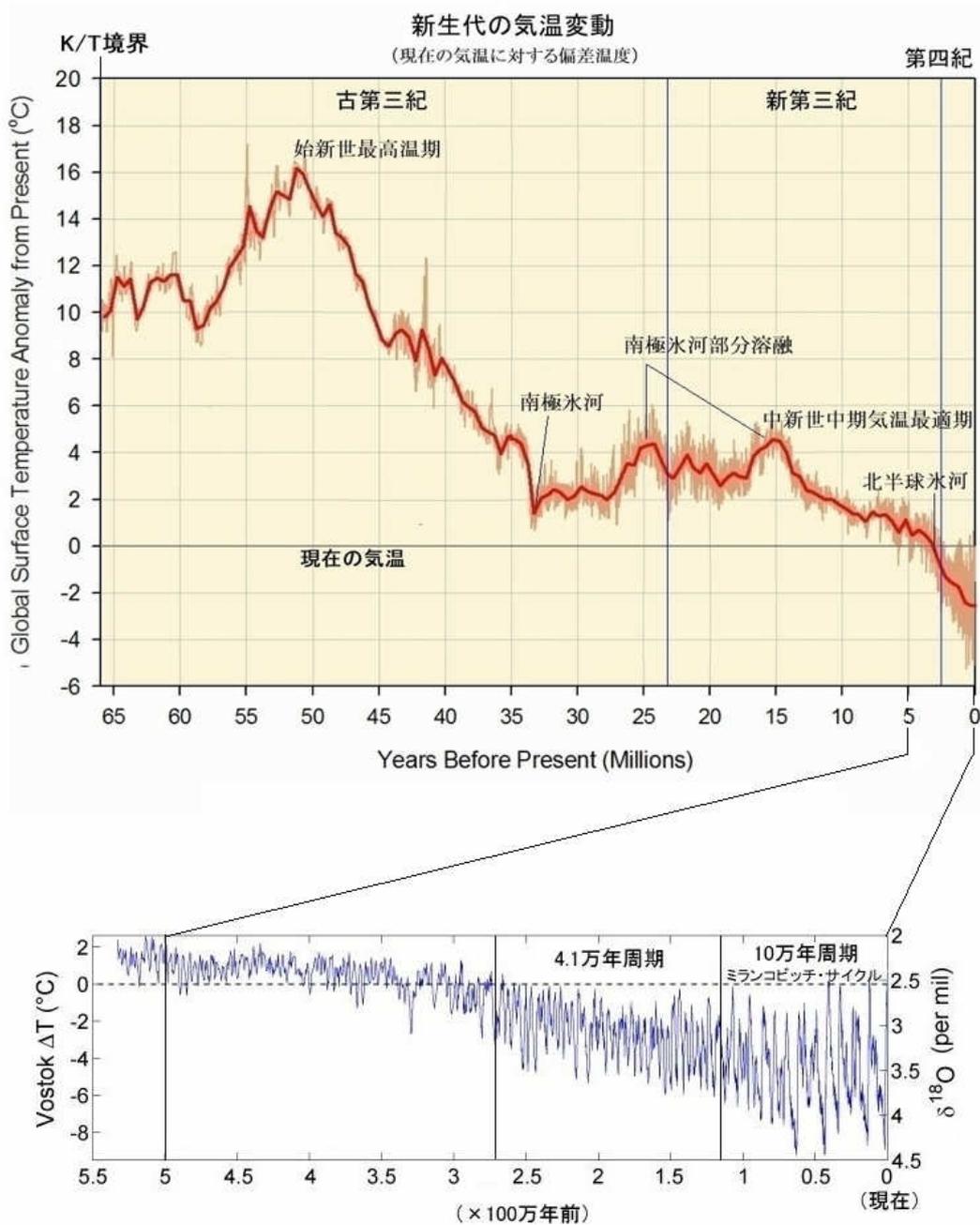


図 1-20 新生代の気温変動

図 1-20 に新生代の気温変化の概要を示します。数値は現在の平均気温に対する偏差温度

を示しています。現在は地質年代的には新生代第四期完新世（西暦 2000 年を基準として 1 万 1,700 年前以降の時代）です（図 1-20 の右端）。

中生代白亜紀にメガリスの崩落による部分的なマントルオーバーターンが起きて高温化した後、K/T 境界線（中生代白亜紀と新生代古第三紀の境界線）の大絶滅を経て少し気温は低下しました。それでも新生代に入った頃（6600 万年前）の気温は現在よりも 10~12°C 程度高かったことが分かります。

その後再び気温は上昇傾向を示し、5000 万年ほど前に新生代の最高温期である「始新世（約 5,600 万年前から約 3,390 万年前）最高温期」を迎えました。この頃の気温は現在よりも 15~16°C 程度高温でした。始新世最高温期が起こった原因については諸説あるようですが、決定的なものはないようです。

新生代は K/T 境界線の大絶滅によって巨大恐竜が絶滅した後の時代であり、生き残った小型恐竜から派生して進化した鳥類、そして哺乳類の適応放散が起きました。始新世最高温期も含めて高温であった古第三紀の生態系は豊かであったようです。

現在、古第三紀よりもはるかに低温な第四期完新世において、「2°C 程度の気温上昇によって地球の生態系が高温化によって灼熱地獄となって破壊される」という類のプロパガンダが行われています。これは過去の地球の歴史を無視した非科学的な主張です。

始新世最高温期の後は、超大陸パンゲアの分裂開始から 2 億年余りが経過し、次第に火成活動は沈静化し、海洋プレートの生産性も低下して地表面環境は気温の低下局面に入ったと考えられます。

3400 万年ほど前には南極に氷床が出来始めたと考えられています（それ以前は地球上に氷床、氷河は存在しなかった）。2500~1500 万年前には少し気温が上昇して南極氷床は部分的に溶融しましたが、その後も寒冷化が進みました。

500 万年前頃からは北半球でも氷河が発達し始め、地球は氷河期に入りました。長期的な傾向としては、現在も寒冷化が続いています。この氷河期は次の超大陸アメイシアが分裂を開始する 3 億年程度先まで続くことが予測されます。

観測データの存在しない太古の気温変動を復元するには何らかの年代測定が可能な指標となる物質を分析することになります。

年代を特定するのに便利なのは年代によって積層した地層を分析することです。もっとも基本的なデータとして利用可能なのは、海洋地殻上に積層した堆積物を分析することです。しかし、海洋地殻は中央海嶺で誕生した数億年後には海溝からマントル中に沈み込んでしまうため、それ以前のデータを得ることは出来ません。

それ以前のデータについては、大陸地殻の付加体の中から探し出すことが必要になります。付加体の分析は、力学的・熱学的な変性を受け変形・分断されているために海底堆積物分析よりもはるかに困難な作業となることが予想されます。

図 1-20 下の図は、海底堆積物に含まれる有孔虫の分析による  $\delta^{18}\text{O}$ （質量数 18 の酸素同位体比率）から推定した気温変動を示したものです。これによると、500 万年前以降、気温

の変動振幅が次第に大きくなりながらも、全体的な傾向としては気温は低下傾向を示しています。

### (3) ミランコビッチ・サイクルと氷期-間氷期サイクル

氷河期に入り、260 万年ほど前から気温の周期的な変動が大きくなりました。これは惑星としての地球が太陽を巡る公転運動の軌道要素の周期的な変動による影響だと考えられています。

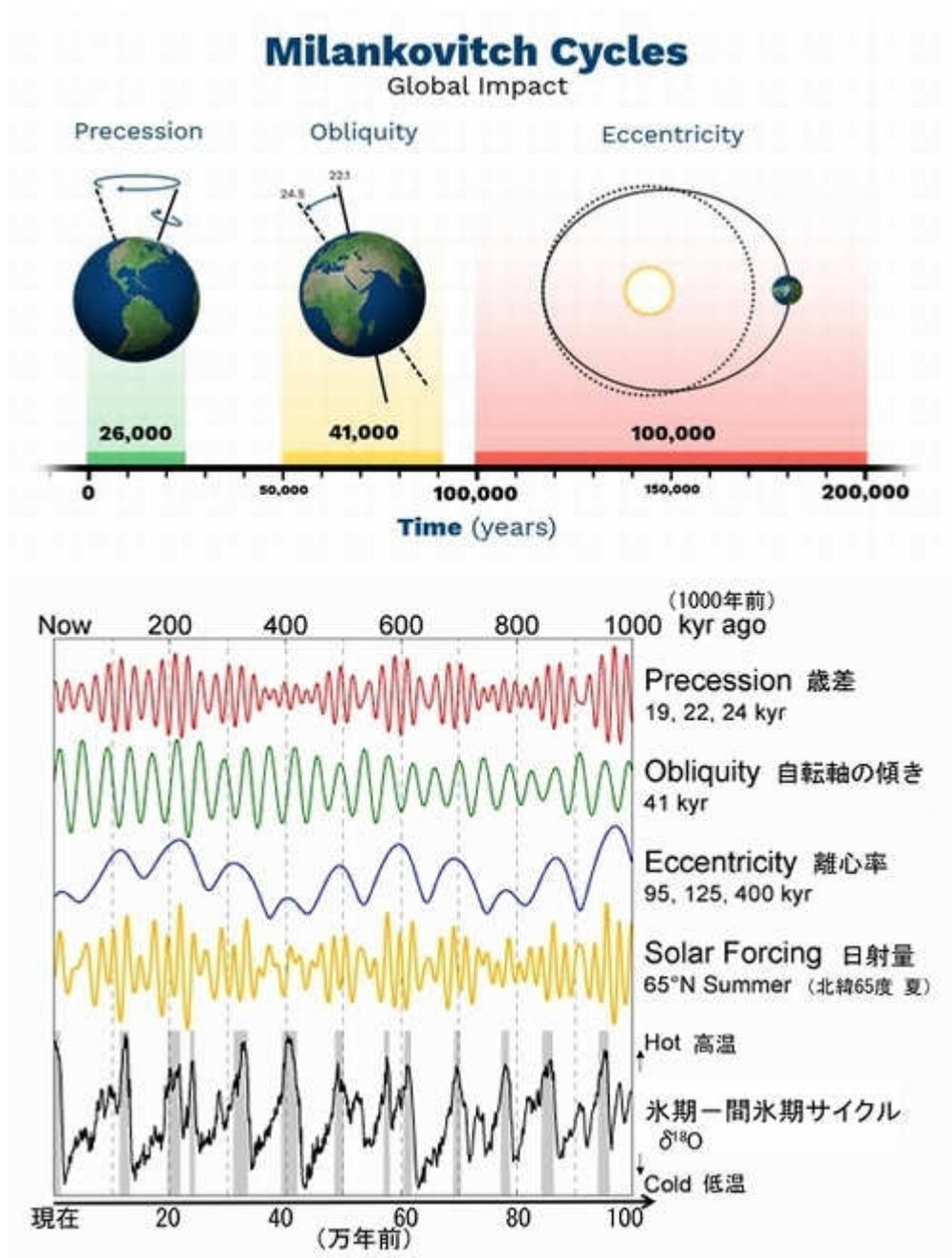


図 1-21 ミランコビッチ・サイクル

地球の自転軸の回転運動＝歳差運動の変動周期は 2 万年程度（1.9 万年、2.2 万年、2.4 万年）です。地軸の傾きが 22.3°-24.5°の間で変化する周期は 4.1 万年程度です。地球の公転

軌道の離心率の変動周期は 10 万年程度（9.5 万年、12.5 万年、40 万年）です。

これらの軌道要素の影響で、地球が太陽放射から受け取る有効放射が変動することで気温の周期的な変動が現れます。

260 万年～120 万年前の期間は、気温の変動周期は 4.1 万年程度であり、120 万年前から現在までは 10 万年程度です。この 120 万年間は離心率の周期的変動の影響が顕著に表れています。

この地球の軌道要素の複合的な周期変動による地球の太陽放射に対する受光能力の周期的変化をミランコビッチ・サイクルと呼びます。

受光能力が小さい時期は地球は寒冷な「氷期」となり、受光能力の大きい時期は氷河期の中では例外的に暖かい「間氷期」になります。

現在は 1 万 2000 年ほど続く間氷期にあります。この期間を地質年代的には新生代第四紀完新世としています。

#### (4) 気温によって変動する CO<sub>2</sub> 濃度、CH<sub>4</sub> 濃度

ミランコビッチ・サイクルによる地球の太陽放射に対する受光能力の変動に従って地球の気温が変動していることが分かりました。

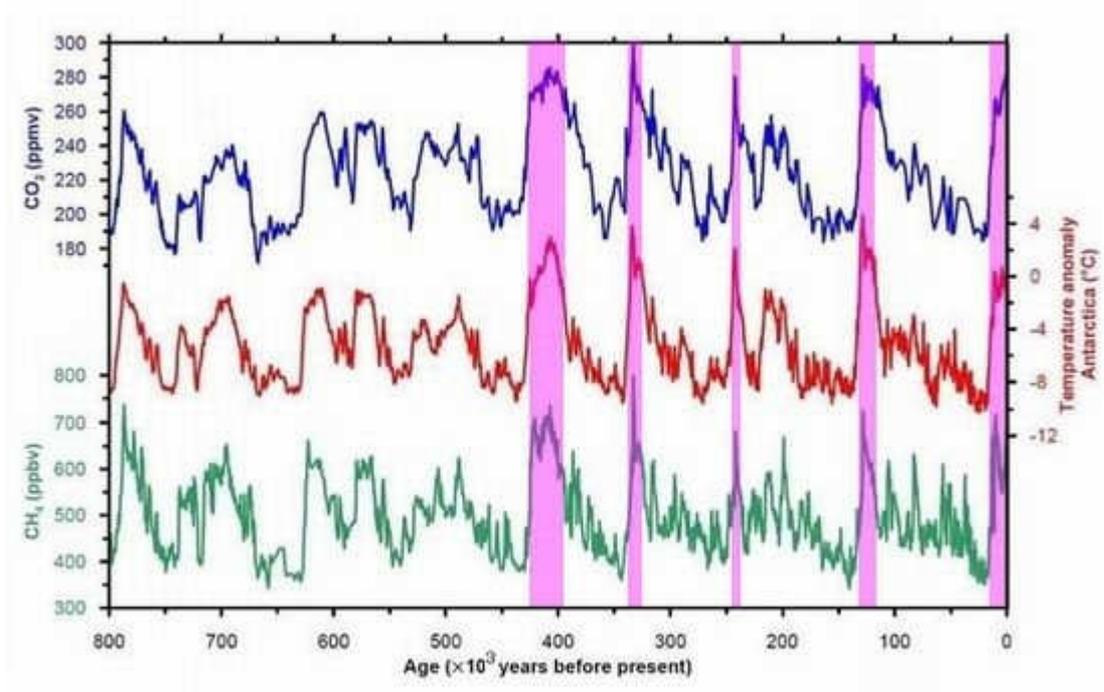


図 1-22 気温、CH<sub>4</sub> 濃度、CO<sub>2</sub> 濃度の変遷

図 1-22 は南極の氷床コアの分析から得られた直近の 80 万年間についての気温の変動（赤）、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変動（青）、そして大気中 CH<sub>4</sub> 濃度の変動（緑）を示しています。図からわかるように、気温変動に同期して CO<sub>2</sub> 濃度と CH<sub>4</sub> 濃度が変動しています。

図にピンクで着色した部分は氷河期の中では例外的に暖かい「間氷期」です。右端の 1 万年余り継続している間氷期が「完新世」です。

CO<sub>2</sub> などの気体の水に対する溶解反応は発熱反応です。したがって環境温度が上昇すると

温度変化を緩和する方向、つまり吸熱反応である CO<sub>2</sub> が海水中から大気中に放出される方向に平衡状態が遷移します。

これは、ビールなどの発砲飲料を冷却すれば泡立ちが少なくなり、暖めれば盛んに泡を出すことで日常的に経験しています。

つまり、気温の変動に CO<sub>2</sub> 濃度、CH<sub>4</sub> 濃度が同期しているのは、気温変動が原因となって、結果として大気中の CO<sub>2</sub> 濃度と CH<sub>4</sub> 濃度が従属的に変動しているからです。

この現象は、氷期-間氷期サイクルに限らず、普遍的な現象として「気温の上昇は大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を上昇させる」ことを確認しておく必要があります。

### (5) 完新世の気温変動の概要

図 1-23 は米国の GISP2 (Greenland Ice Sheet Project 2)によるグリーンランドの氷床コア分析から復元された完新世の直近 10000 年間程の気温変動を示しています。

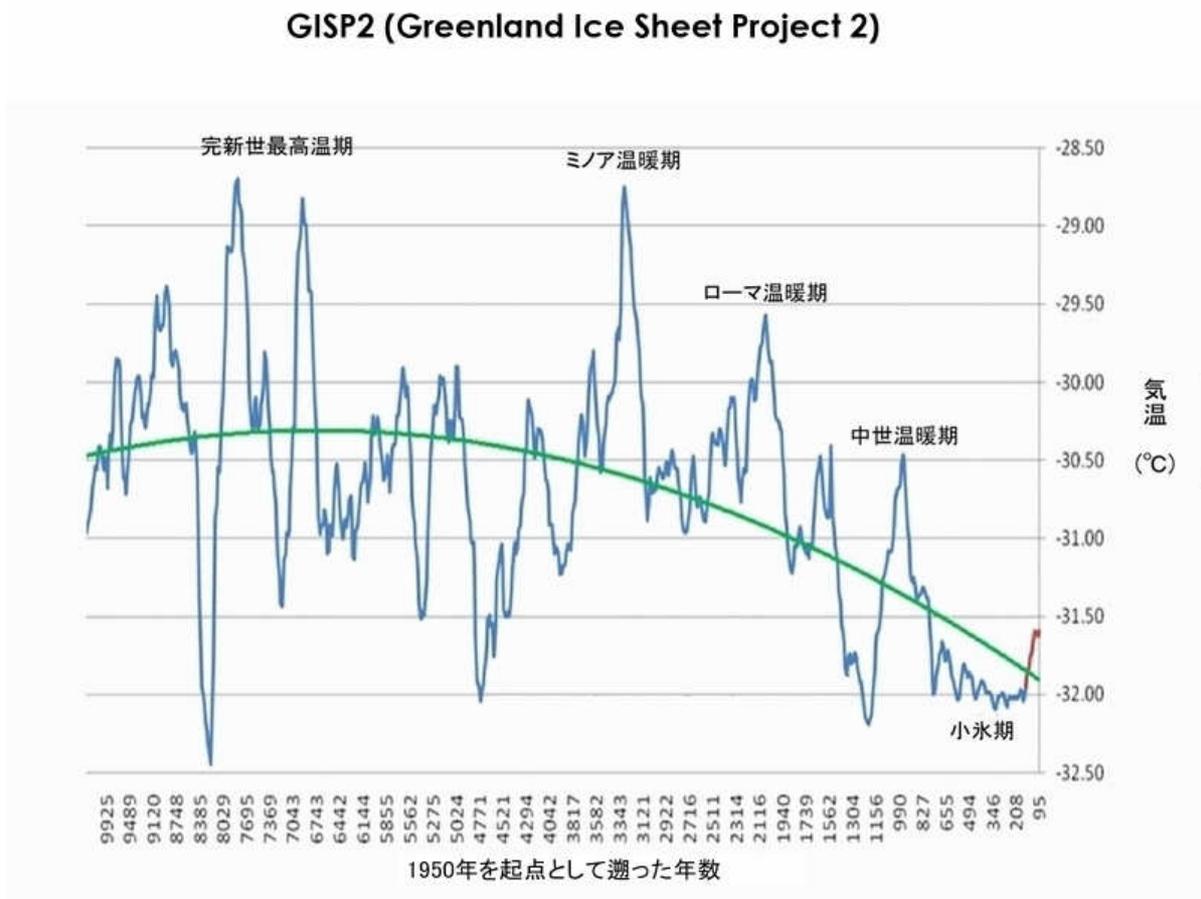


図 1-23 GISP2 による完新世の気温変動

まず、完新世の気温はかなり激しく変動していることが分かります。

8000~7000 年ほど前の気温極大期は古気候では完新世最高温期あるいは気候最適期と呼ばれる完新世で最も気温の高い時期に対応すると考えられます。

その後の 3000 年間は比較的気温の低い状態が継続した後、3000 年ほど前に明瞭な気温極大期が現れます。これはミノア温暖期と呼ばれる時期であり、地中海文明が栄えました。

2000年ほど前に現れた気温極大期はローマ温暖期と呼ばれ、ローマ帝国が隆盛を誇った時期です。

更に1000年ほど前に現れた気温極大期は中世温暖期と呼ばれる時期で、北欧のバイキングが勢力を伸ばし、南は地中海沿岸から北はグリーンランド南部にまで版図を広げていました。

その後地球は寒冷化し、14世紀～19世紀までは完新世で最も長期の寒冷期である小氷期(Little Ice Age)を経験しました。

欧州ではペストの大流行で人口が激減しました。日本でも江戸時代には冷害による飢饉が頻発しました。日本を震撼させた元寇もアジア大陸北部の寒冷化によってモンゴル帝国が南下政策をとったことが一因であると言います。

19世紀半ばに小氷期が終わり、中世温暖期から1000年ほどが経過して、現在まで気温の回復傾向が続いています。

小氷期の終盤に興った産業革命から現在までの気温上昇は0.6～1.0℃程度とされています。西暦2000年以降は気温の上昇傾向は小さくなっています。

GISP2の気温復元図を大局的に見ると、ミノア温暖期以降、1000年程度の周期で気温極大期が現れながらも、全体として気温は低下傾向を示し、同時に気温極大期の気温も低下しています。

現在の間氷期＝完新世は既に1万2000年ほど継続しています。ここ数10万年間の気温の変動傾向から見れば今後とも、完新世の気温は次の氷期に向かって低下していくと考えられます。

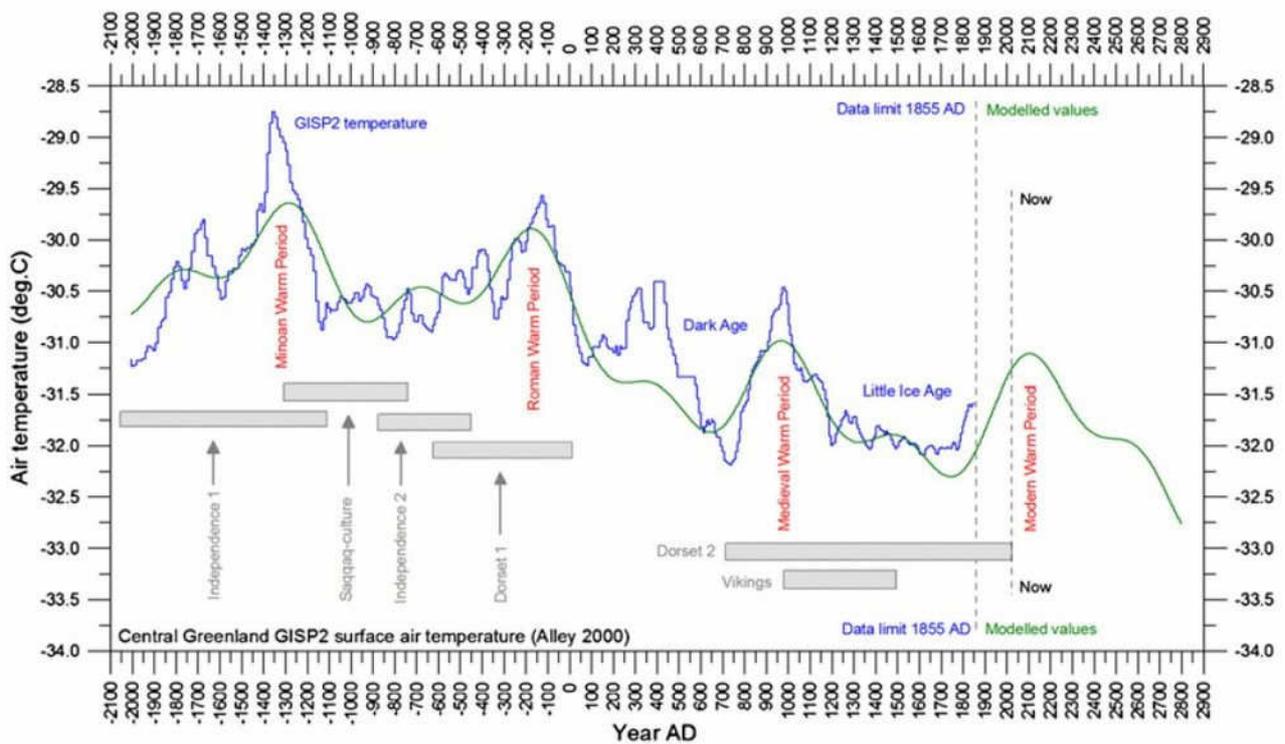


図1-24 GISP2の気温復元図と Humlum による近似曲線

GISP2によって復元された完新世の気温変動パターン等について、ノルウェーのオスロ大学の O. Humlum 等は周期的な変動要素の分析を行い、図 1-24 に示す近似曲線を求めて将来予測を試みています。

Humlum 等は、GISP2 の最近の 4000 年間の気温変動データ（図の青の実線）を分析し、自然周期モデルによる近似曲線と将来的な予測値（緑色の曲線）を求めました。

Humlum 等のレポートの結論部分で次のように述べています。

- (1) 本研究では、スバルバル (Svalbard) とグリーンランドの気候・気象記録から、いくつかの持続的な周期変動を同定した。いくつかは地球を周回する月の公転軌道の既知の周期変動に対応しているようであり、その他は太陽の変動に対応している様である。（前略）
- (2) 小氷期に続く西暦 1800 年頃からの現在の温暖期は、グリーンランド GISP2 の気温記録に基づく 3 つの期間の単純な入力だけで再現できる。どうやら LIA（小氷期）以降の現在の温暖化は、少なくとも過去 4000 年間を特徴づけるものとして知られている自然の気候変動の結果である可能性が高い。
- (3)（前略）私たちの経験に基づくと、現実的な予測時間の範囲はレコード全体の長さの約 10 ~ 25% であると考えられます。グリーンランドの場合、LIA 後の現在の温暖期が、大局的な後期完新世の寒冷化が始まる前に、21 世紀の大部分にわたって続く可能性が高いことを示唆している。

つまり Humlum 等の研究によると、小氷期が終わってから現在まで続いている気温の上昇傾向は、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化脅威説が言うようにかつて人類が経験したことの無い異常な気温上昇などではなく、完新世の直近の過去 4000 年間繰り返し現れてきた 1000 年周期の気温極大期が現れたものであり、その原因は月の公転軌道の周期変動や太陽活動の変動なのです。

そして、この温暖期は、完新世の全般的な傾向としての次の氷期に向かう寒冷化の前に、21 世紀の大部分にわたって継続すると予測されるのです。

Humlum 等の将来予測は元データ長の 10-25% の範囲の将来予測が信頼できるとしています。4000 年間の元データ長に対して 400~1000 年間の範囲の将来予測は信頼できることになります。予測曲線を見ると現在の温暖期後の寒冷期は小氷期よりも更に寒冷化が進みそうです。

現在の米国を中心とする暴力的な社会構造が変化しなければ、寒冷化による農業生産の減少によって食糧争奪を原因とする世界戦争を含む過酷な時代の到来が予測されます。

## 1-5 氷河期の気温変動と太陽放射

地球の表面環境に熱エネルギーを供給する熱源は二つです。一つはマントルを介した地球自身の持っている熱エネルギーの地表面環境への放出です。そしてもう一つは太陽からの放射エネルギーです。

現在は次の超大陸アメイシアの形成に向かうウィルソン・サイクルの中盤から後半に向かう時期です。地球内部熱の放出が極小化する時期であり、地球史上5回目の氷河期の只中にあります。

地球史的に見て、氷河期と氷河の存在しない暖かい時期という大きな気温変動はウィルソン・サイクルに見られる核、マントルという固体地球の変動に起因しています。

現在は氷河期であり、上部マントルの活動が不活発であり、地球の内部熱の放出が小さく、比較的安定しています。したがって、氷河期における地球の気温は、主に地球の太陽放射に対する受光能力によって変動すると考えられます。

300万年程前から始まった現在の氷河期は、100万年前頃から10万年程度の周期の大きな気温変動を示しています。この原因は、既に見たように、太陽を周回する地球の公転運動に関する主に3つの軌道要素（歳差運動、地軸の傾き、軌道の離心率）の周期的な変動に起因する太陽放射に対する地球の受光能力の変動＝ミランコビッチ・サイクルによるものです。

現在は、幸い、氷河期の中では例外的に比較的暖かい間氷期が1万2000年間ほど継続しています。GISP2によって復元された完新世の気温変動を見ると、かなり大きな気温変動を示しています。直近の3000年間を見ると、現在を含めて、1000年ほどの周期で明瞭な気温極大期が現れています。

O. Humlum 等の研究では、直近4000年間の気温変動は月の公転軌道と太陽放射の変動によるものだと報告されています。

ここでは、完新世の気温変動と太陽放射の関係について少し詳しく見ておくことにします。

### (1) 太陽黒点数と太陽放射

太陽活動について、最も長い観測データが存在するのは太陽黒点（相対）数です。

太陽黒点数は周期的に数が増減することが知られています。20世紀では黒点の変動周期は11～12年程度でした（図1-25に示す太い実線で示した曲線の変動周期）。

更に、黒点の周期変動は5周期ごとに増減しています（細い実線で示した黒点数の極大値の包絡線）。この50年ほどの大周期を「吉村サイクル」と呼びます。

黒点数が多い時期は太陽活動が活発であり、黒点数が少ない時期は太陽活動が不活発であることが知られています。また、黒点数が大きいくほど黒点周期は短くなります。

特に黒点数が少ない時期は黒点数の極小期として歴史的に記録されています。

大周期Vの吉村サイクルを見ると、1950年前後に極大期を示し、1970年頃に極小値を示しています。大周期VIは1970年頃の極小値から上昇傾向を示しています（ご承知のように、

大周期Ⅵの後半は、太陽黒点数の発現が不安定化した異常大周期になりました。)

この黒点相対数の大周期の変動傾向は、第二次世界大戦後の気温変動傾向と良く合致しているように見えます(詳細は後述)。

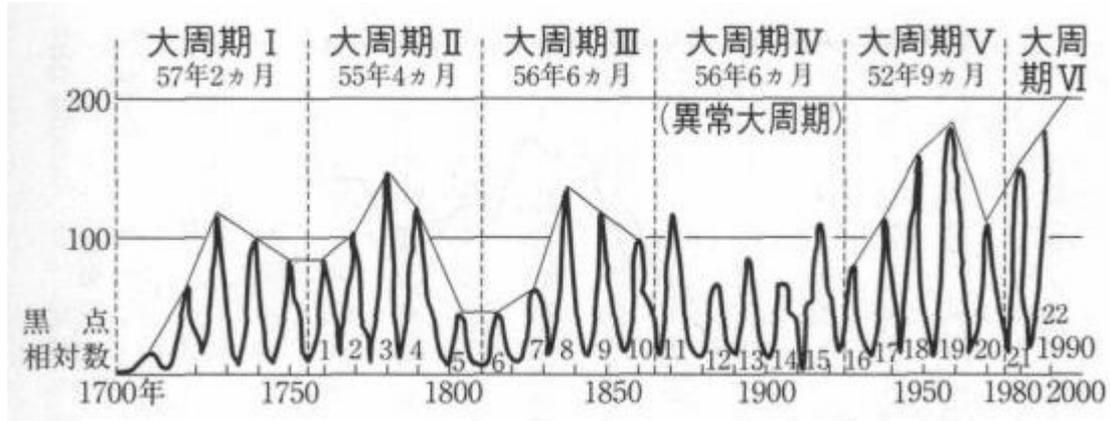


図 1-25 太陽黒点周期と吉村サイクル

現在では、太陽放射の強さを測定することが可能です。図 1-26 に示す 2 つのグラフは、同じ時間軸で全太陽放射線量 (TSI) と太陽黒点数の測定値を示しています。表示されている期間では全太陽放射線量は平均 1366(W/m<sup>2</sup>)程度を示しています。

図からわかるように、全太陽放射線量と太陽黒点数の変動は大変良く同期していることが分かります。

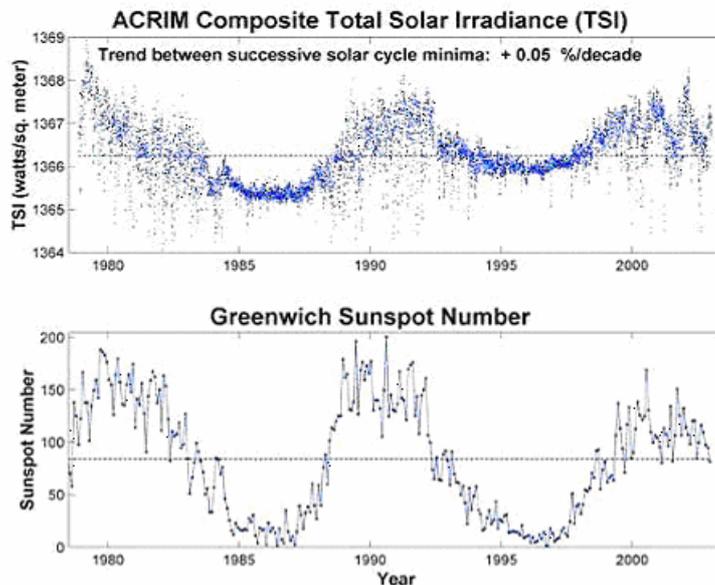


図 1-26 太陽放射照度と黒点数

この両者の関係から、過去の太陽黒点数の記録を用いて、全太陽放射線量の観測記録のない時期の値を復元することが試みられています。その例を図 1-27 に示します。

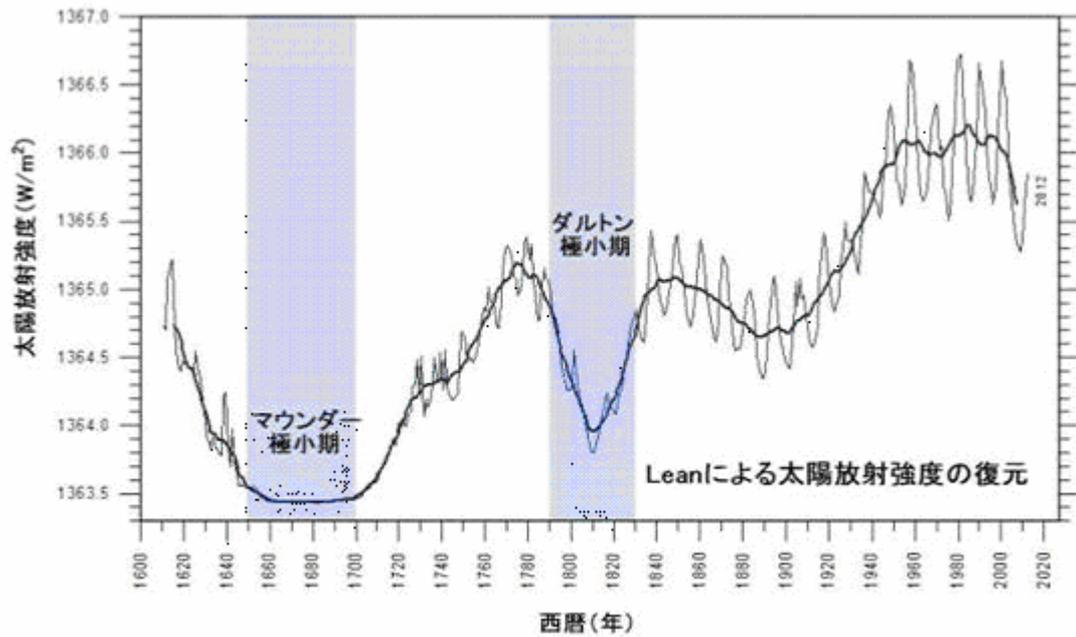


図 1-27 太陽放射照度復元図

## (2) 太陽黒点数と侵入宇宙線量

前述の通り、太陽の活性度の変化に従って太陽放射の強度、太陽黒点数が変動します。

黒点周辺では爆発的な現象である太陽フレアが発生し、それに伴って高温の気体が電子と原子核に電離したプラズマが放出されています。プラズマの流れを「太陽風」と呼びます。太陽の活性度が高いときには黒点数が増加するため、太陽風も強くなります。

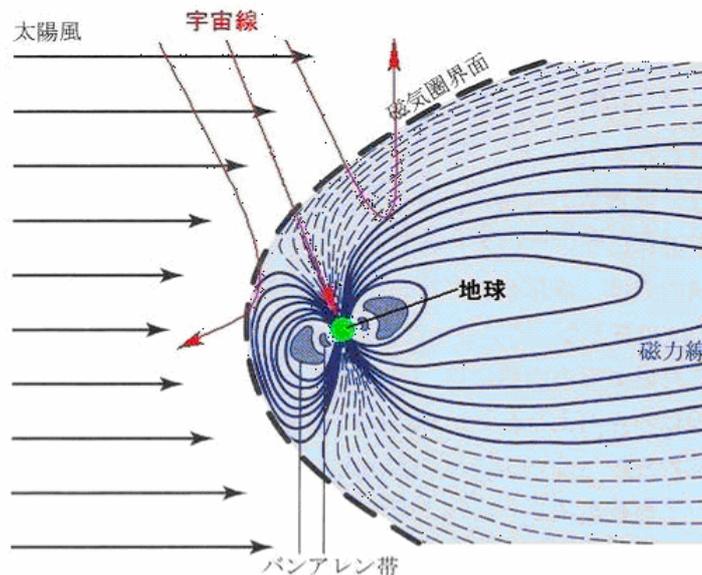


図 1-28 太陽風と地球磁場

太陽風は電離したプラズマの流れなので、地球磁場に影響を与えます。太陽に面する側の地球磁場は太陽風によって押しつぶされ磁力線が密になる一方、地球の背面の磁場は後方に引き伸ばされます。

地球磁場は、宇宙空間から地球に降り注ぐ高エネルギーの荷電粒子＝宇宙線を捕捉して地球表面に届く宇宙線量を生物が生存できる程度に減らしています。

太陽風が強くなると、地球磁場が稠密になるため、地球の表面にまで到達する宇宙線量が減少します。

太陽風は太陽活動の活性度に同期して強さが変動します。太陽風の強さと黒点数も同期して変動することになります。

したがって、太陽黒点数と侵入宇宙線量は負の相関関係を示すことになります。

図 1-29 は太陽黒点数と侵入宇宙線量の観測値を同じ時間軸で示したものです。

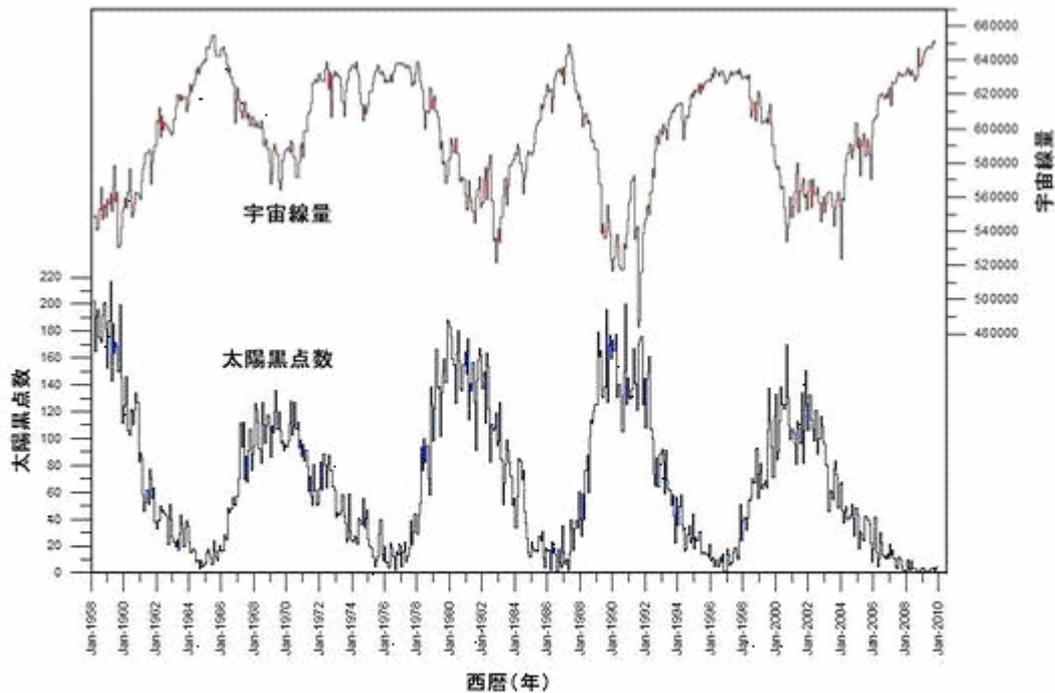


図 1-29 侵入宇宙線量と太陽黒点数

地球大気にまで侵入した宇宙線は、大気を構成する気体分子である酸素  $O_2$  や窒素  $N_2$  の原子核に衝突して二次宇宙線として陽子、中性子、パイ中間子、ミュオンなどを発生させます (図 1-30 参照)。

二次宇宙線の一部である中性子が窒素  $N$  (質量数 14、陽子数 7、中性子数 7) に吸収されると同時に陽子を放出することで質量数 14 の炭素  $C$  の同位体である  $^{14}C$  (質量数 14、陽子数 6、中性子数 8、半減期 5700 年) になります。

太陽活動が活発になると大気に侵入する宇宙線量が減少するため  $^{14}C$  の生成量が減少します。太陽活性度と  $^{14}C$  の生成量は負の相関関係を示します。したがって  $^{14}C$  の存在比率は間接的に太陽の活性度を示す指標として利用することが出来ます。

ただし、産業革命以後は化石燃料消費量の増加や、1940 年代以後の核爆発実験の影響で  $^{14}C$  の存在比率が乱されているため、利用が難しくなっているようです。

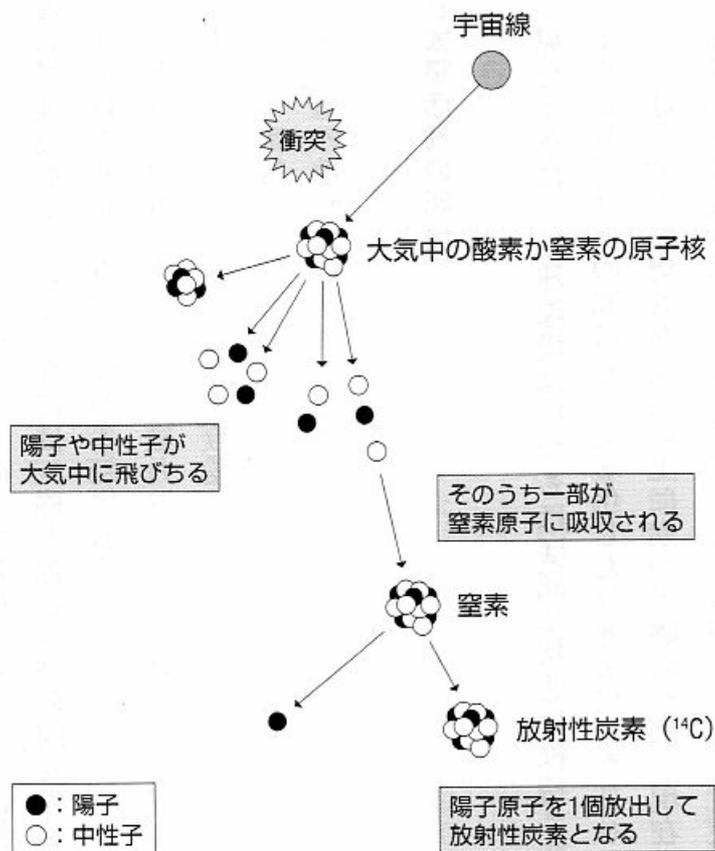


図 1-30 宇宙線による  $^{14}\text{C}$  の生成

### (3) 歴史的な気温変動と太陽活動

ここまで、間接的に太陽の活性度の指標となる資料＝プロキシについて見てきました。まとめると以下の通りです。

- ①太陽黒点数（太陽放射と正の相関）
- ②太陽黒点周期（太陽放射と負の相関）
- ③ $^{14}\text{C}$  の同位体比率＝ $\Delta^{14}\text{C}$ （太陽放射と負の相関）

直接的に太陽放射についての観測データが存在しない時期において、年代の特定できる資料からプロキシを抽出することによって、太陽活動の活性度ないし太陽放射照度を復元することが出来ます。

図 1-31 の上の図は Moderg (2005 年) によって、樹木の年輪あるいは湖底・海底堆積物の分析から復元された中世温暖期以降の気温変動を示しています。

図 1-31 の下の図は Feynman (1988 年) による  $^{14}\text{C}$  の同位体比率  $\delta^{14}\text{C}$  の変動を示したものです。 $^{14}\text{C}$  の同位体比率は太陽放射と負の相関を示すため、比較しやすくするために座標軸は上向きがマイナス方向にしています。

図に薄い青で示した範囲は太陽黒点数の極小期を示しています。

図からわかるように、気温復元曲線と  $\Delta^{14}\text{C}$  の変動曲線はよく同期しています。

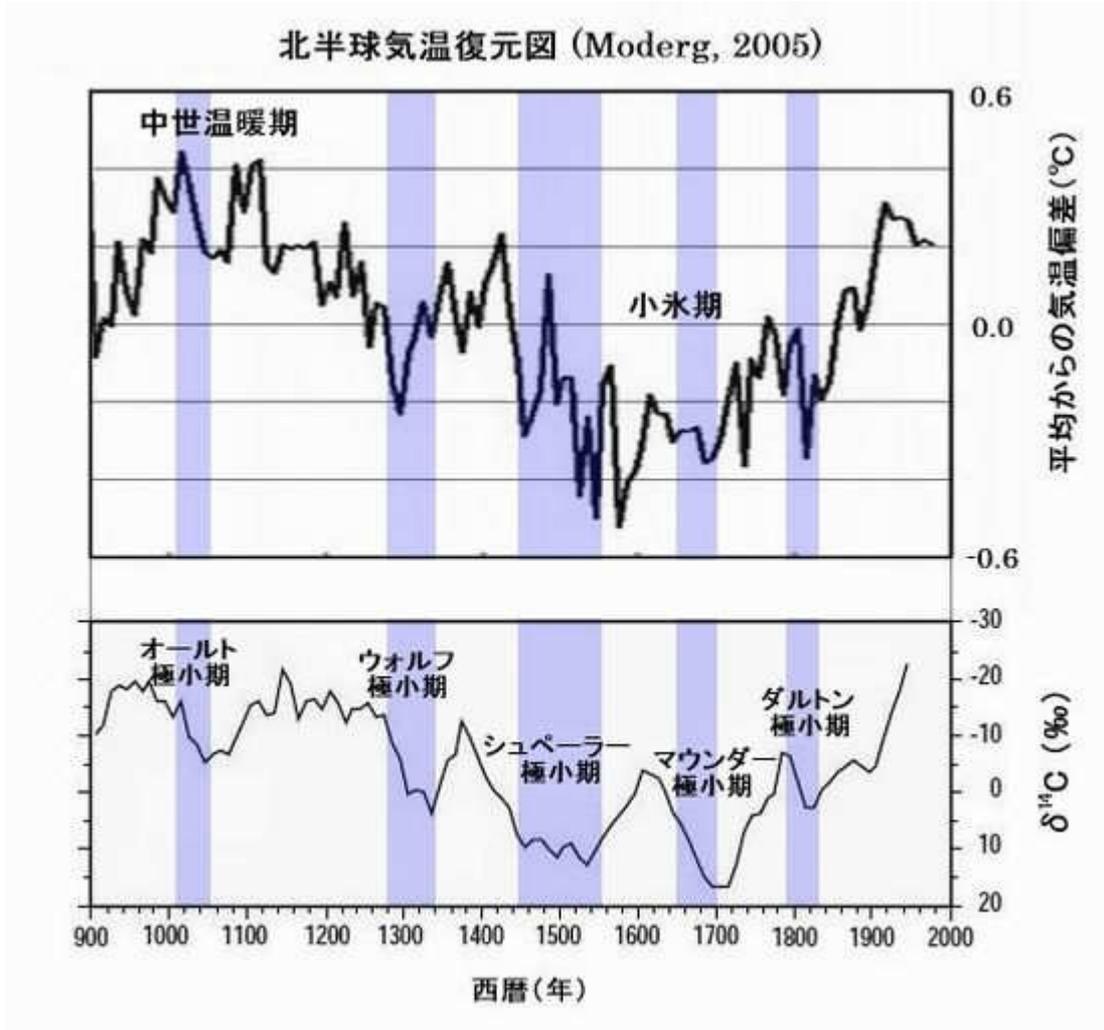


図 1-31  $\delta^{14}\text{C}$  と気温復元図

図 1-32 は、宮原 (2009 年) による屋久杉の年輪に含まれた  $^{14}\text{C}$  の同位体比率  $\Delta^{14}\text{C}$  の変動を示しています。座標軸の方向は逆ですが、 $\Delta^{14}\text{C}$  は前掲の Feynman の  $\delta^{14}\text{C}$  の変動傾向と良い一致を見せています。

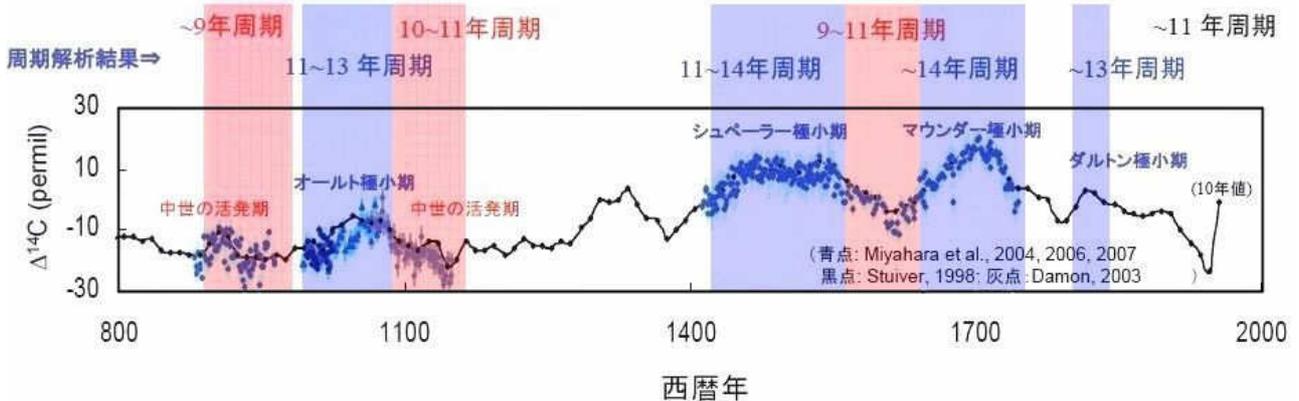


図 1-32 屋久杉の年輪分析による  $\Delta^{14}\text{C}$

さらに、この図には太陽黒点周期を併記しています。20世紀の太陽黒点周期は11年間程度でした。

図から  $\Delta^{14}\text{C}$  が大きい値を示す期間は太陽黒点周期が長いことが分かります。太陽黒点周期と  $^{14}\text{C}$  の同位体比率はいずれも太陽放射照度と負の相関を示すため、両者の増減傾向は一致することを示しています。

中世温暖期（西暦1000年前後）の太陽黒点周期は9～11年間程度、小氷期（14世紀中盤～19世紀中盤）の太陽黒点周期は11～14年間程度です。

したがって、太陽黒点周期からも、小氷期の太陽放射は現在よりも弱く、中世温暖期の太陽放射は現在よりも強かったと考えられます。

以上、中世以降の気温変動を見てきましたが、この期間の気温変動は太陽活性度＝太陽放射照度に大変よく同期していることが確認できました。

氷期－間氷期サイクルに見られる直近100万年間ほどの氷河期の大局的な気温変動はミランコビッチ・サイクルによる太陽放射照度の変動によって起こり、間氷期（完新世）の気温変動は太陽の活性度の変動による太陽放射照度の変動に同期していることが分かりました。

したがって、氷河期の気温変動の主要な原因は太陽放射照度の変動であると考えられます。

#### (4) 産業革命以後の気温変動と太陽放射

産業革命以後の期間は直接観測された気温データが存在しています。したがって歴史的な気温の復元とは異なり、観測データを適切に統計処理することで地球の気温変動が分かるはずで

す。しかし、地球という面的な広がりを持つ場の気温をどのように代表させるのかはそれほど単純ではありません。年代を遡るほど観測データ数は少なくなり、観測地点の数も文明化された地域に偏ることになります。

これらの事情を考慮して、世界の気温の変動傾向を示す指標として観測地点の平均気温からのずれ＝「気温偏差」で表すことにしています。

最も一般的に利用されている指標は「世界月平均気温偏差」です。観測期間の基礎となる観測地の観測月の平均気温を固定して、そこから実際に観測した気温の月平均がどの程度ずれているかという気温偏差を用いています。

近年利用されている世界的な気温のデータベース、例えばGHCN（米国海洋大気庁が配布しているGlobal Historical Climatology Network データ）では、Climategate 事件で発覚したように、人為的CO<sub>2</sub>地球温暖化説が広まるにつれ、これを補強するような恣意的な統計処理がされているため、近年の気温変動データは自然科学的な資料としての信頼性が損なわれていることが危惧されます。ここではこうした恣意的なデータ操作を受けていないと思われるデータを紹介します。

図1-33の上の図は、北半球の年平均気温偏差（青の細い実線、太い実線は移動平均をとって平滑化処理をしたもの）と全太陽放射（赤の破線）を示しています。両者の変動傾向は見事に一致しています。

図 1-33 の下の図は、GHCN の統計処理を行う前の世界月平均気温偏差の生データを示しています。この変動も全期間において上の図に赤の破線で示した全太陽放射と極めて良い一致を示しています。

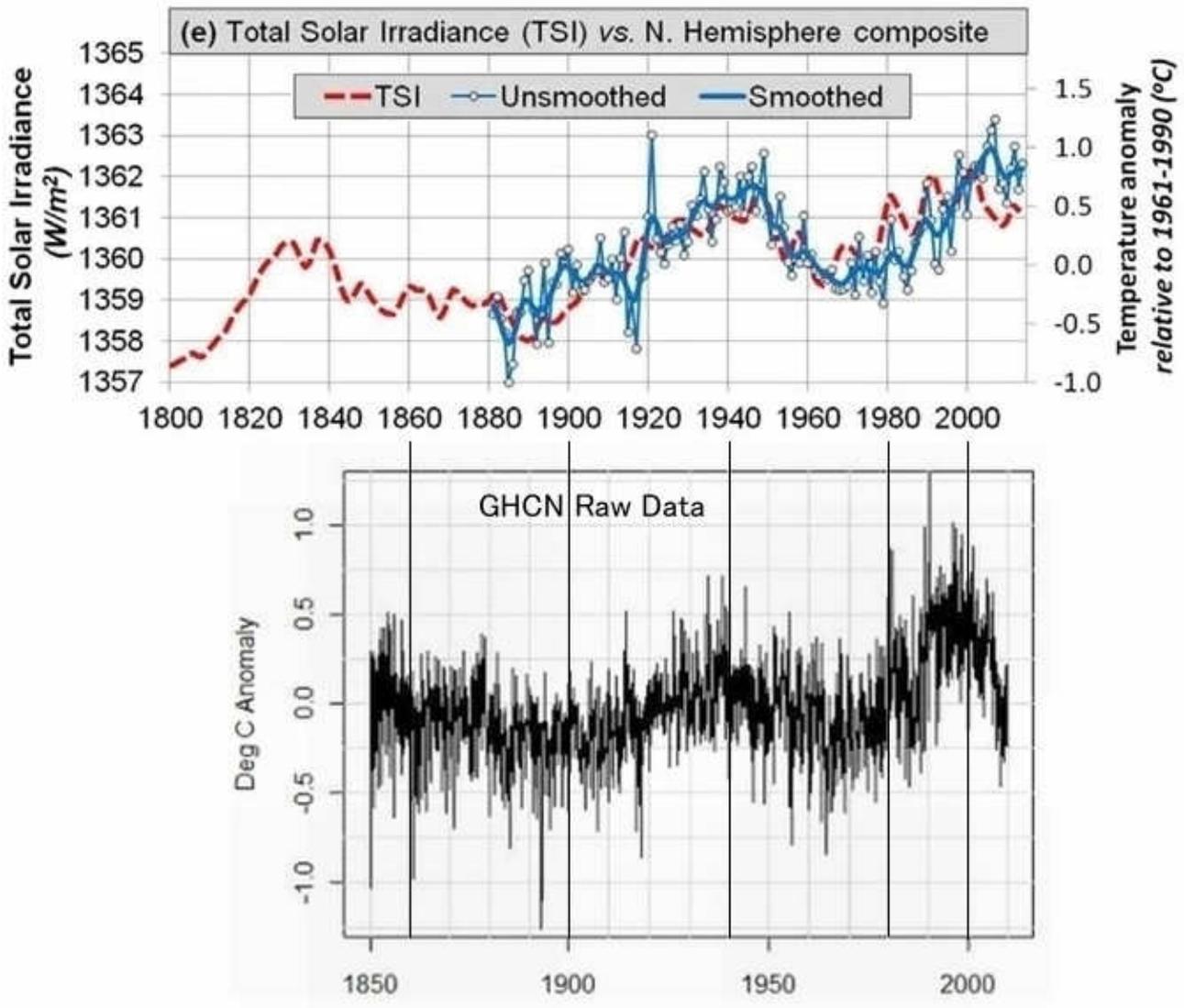


図 1-33 太陽放射と気温変動

参考のために、太陽黒点周期の変動と気温変動を比較した図 1-34 を示します。黒点周期と太陽放射は負の相関を示すので、図の黒点周期の座標軸は下向きを正方向としています。

1860 年以降の太陽黒点周期は 10~12 年間程度の範囲にあります。図に示す通り、太陽黒点周期と気温偏差の変動傾向はよく一致しています。

以上から、産業革命以後の近年の気温変動は、産業革命以前の完新世の歴史的な気温変動と同様に、主に太陽放射の強さ、あるいは太陽の活性度が主要な変動要因だと考えられます。

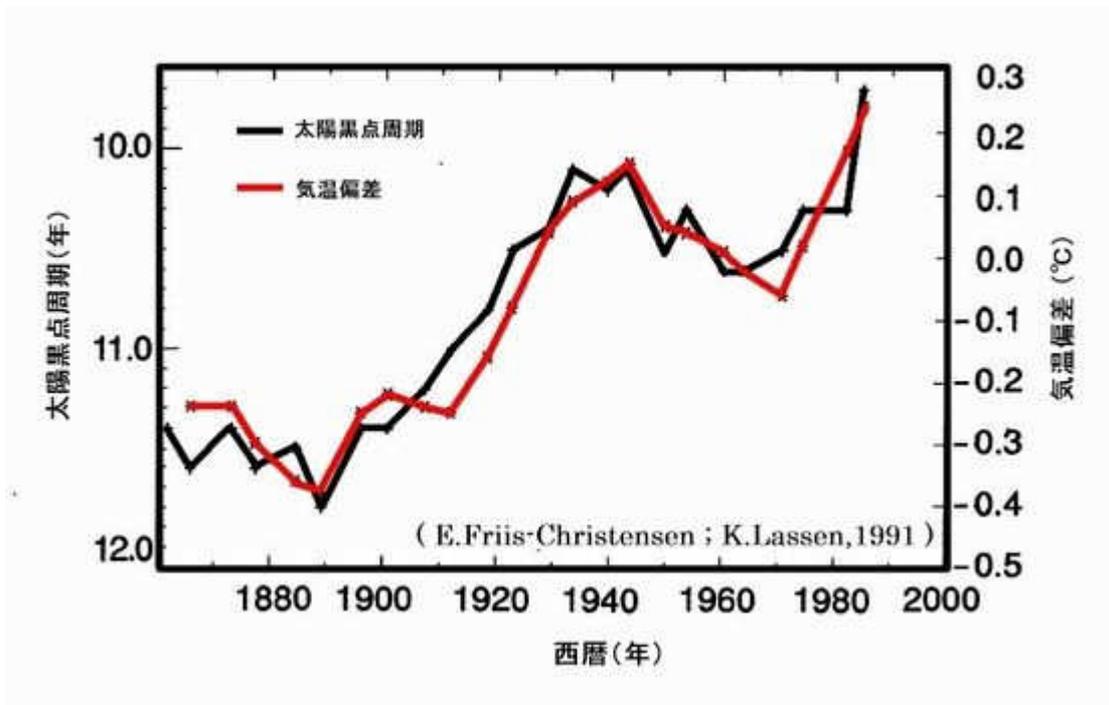


图 1-34 太陽黒点周期と気温

## 1-6 気象学を政治の道具にした Climategate 事件の本質

これまで、地球の気温変動について自然科学、ないし歴史的な視点から検討してきました。

しかし、現在の政治・経済・文化まで巻き込んだ「人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化」の狂騒状態を考える上では、気象学・自然科学の劣化について見ておくことが必要不可欠です。

人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化説が登場したのは 1980 年代です。その登場自体が政治的・経済的な理由であったと言われていています。

米国のスリーマイル島原発炉心溶融事故、旧ソ連のチェルノブイリ原発核爆発事故を受けて、西欧を中心に世界は脱原発の世論の高まりを見せ、原子力関連企業は危機的な状況を迎えていました。

ご承知のように、原子力発電は技術的な困難さがあり、当然高コストの発電システムであり、何より核兵器製造と直結する技術であるため、いずれの国においても国家管理された発電技術です。

そこで、平時の核技術の担保のために、原子力発電を温存することは国家的な目的です。原子力発電を生き残らせるために、「発電時」に CO<sub>2</sub>を放出しない原子力発電を残すための方便として登場したのが、自然科学的には極めて出来の悪い仮説であった「人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化脅威説」だったのでしょう。

その後、原子力発電関連企業以外にも「脱炭素社会」という高コスト社会は金儲けになるために、すべての企業が人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化脅威説を強力に支持することになったのです。

これに乗じて、金儲けに加担することを決めたのが気象学者や一部の自然科学者たちです。気象学者、自然科学者の墮落の実情を知る米国の物理学者 Harold Lewis の米国物理学会に対する退会通知の手紙が公開されています。

([https://www.env01.net/d\\_count/download.php?download=3](https://www.env01.net/d_count/download.php?download=3) の pp18-20 参照。)

例えば 1989 年に米国の上院で証言したハンセンは彼のコンピューターシミュレーション結果から「異常な温暖化の原因は 90%以上の確率で人為的 (CO<sub>2</sub>) な影響である」と証言しました。ちなみに公聴会の委員長はあの民主党の「アル・ゴア」でした。

人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化脅威説に特徴的なのが、自然科学的な観測データによって人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化を裏付けるものが存在しないことです。恣意的に調整されたコンピューターシミュレーションの「仮想空間」の中だけに存在する現象だということです。

私が最初に人為的 CO<sub>2</sub>地球温暖化仮説に疑問を抱いたのは、第二次世界大戦後 1950 年代から 1970 年代に急速に地球が寒冷化していたことと矛盾していたことです。

例えば、1970 年代には北極海の海氷面積が異常に拡大し、北極海に面する港湾が使用できなくなるほどでした。当時を知っている世代であれば周知の事実ですが、当時はこのまま氷期に向かうのではないかという議論が盛んにおこなわれていました。

図 1-35 の上の図は北極の気温変動と全太陽放射の変動傾向を示しています。両者の変動傾向は見事に一致しています。

一方、図 1-35 の下の図は同時期の化石燃料消費量∝人為的 CO<sub>2</sub>放出量の推移を示してい

ます。1945年頃は世界中が大戦からの復興で化石燃料消費量が爆発的な増加を開始した時期です。

したがって、1945年～1970年代という時期の寒冷化は、人為的CO<sub>2</sub>地球温暖化仮説と真向から対立する「事実」でした。これは、人為的CO<sub>2</sub>地球温暖化仮説を支持する気象学者たちにとって誠に「不都合な真実」でした。

そこで、人為的CO<sub>2</sub>地球温暖化仮説を正当化するために、気象観測データの方を改竄してしまえば良いと考えた気象学者たちが起こしたのが Climategate 事件でした。

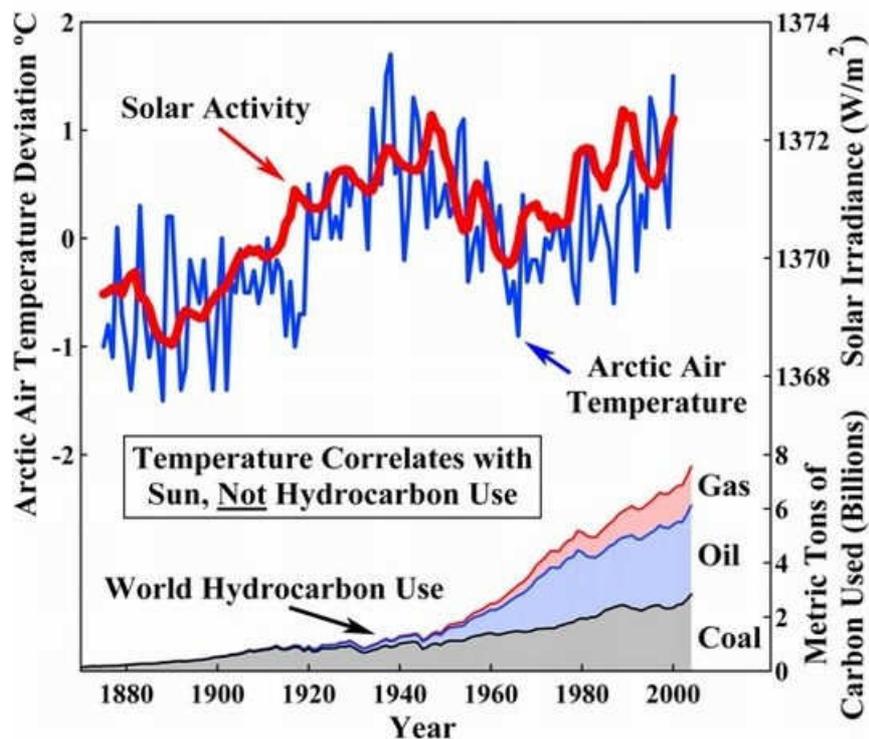


図 1-35 気温、太陽放射、炭素消費量の関係

### (1) GHCN による補正という名の DATA 改竄

気温観測データに対する最も単純な不正行為は観測データの数値を直接改竄することでした。

Climategate 事件において、英国イースト・アングリア大学 CRU (Climatic Research Unit) の Philip D. Jones 教授の電子メールがハッキングされ、その内容が暴露されました。その中には気温観測データを如何に改竄したのかというコンピューター・コードが記されていました。

図 1-36 は GHCN の気温データベースにおいてどのような数値の改竄が行われたのかを示しています。

図 1-36 はオーストラリアのダーウィン空港の気候観測点の年平均気温偏差の経年変化を示しています。

図に青の折れ線で示した年平均気温偏差の変動は観測データそのもの (Raw Data) です。

回帰直線の傾きは $-0.7^{\circ}\text{C}/100$ 年でした。特に1940年代以降に急な気温低下を示しています。これは人為的 $\text{CO}_2$ 地球温暖化仮説のシナリオには全く反する気温の変動傾向でした。

そこでGHCNはRaw Dataに対して図の黒の太い実線で示す値（図の右側のスケール）を加えて「補正（Adjust）」を行いました。その補正された年平均気温偏差が赤の折れ線で示されています。回帰直線の傾きは $1.2^{\circ}\text{C}/100$ 年でした。

補正值は、第二次世界大戦後の顕著な寒冷化を消し去るために1940年代以降急激に大きくなっていることが分かります。

このようにして、人為的 $\text{CO}_2$ 地球温暖化仮説のシナリオに合うように気温観測データに対して補正という名の改竄が大規模に行われたのです。

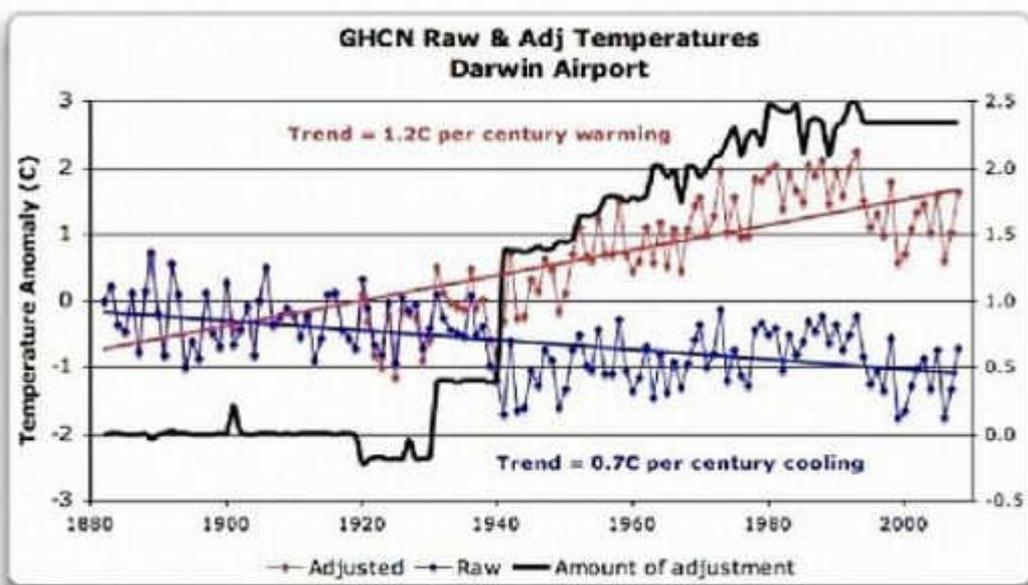


図1-36 改竄されたダーウィン空港の気温観測データ

データの補正＝改竄はどの程度の規模で行われていたのでしょうか？

図1-37はGHCNの提供する世界平均気温偏差を求めるために使用されている気象観測点の数（青の曲線）と、その内何らかの数値補正を行ったデータの割合（黒の実線）を示しています。

これを見ると1990年代までのデータに対する補正は平均的に80%程度の高い割合で実施されていたことが分かります。

一方、GHCNの採用する気象観測点の数の変動はとても奇妙です。図1-37を見ると、第二次世界大戦後に急速に観測点数が増えています。これは当然です。ところが1970年代を過ぎると、今度は逆に観測点数が激減しました。

気象観測点数は近年ほど増加することはあっても顕著に減少することは考えにくいことです。実際には気象観測点数が減少したわけではなく、GHCNが世界平均気温偏差の算出のために採用する気象観測点数が減少しているのです。

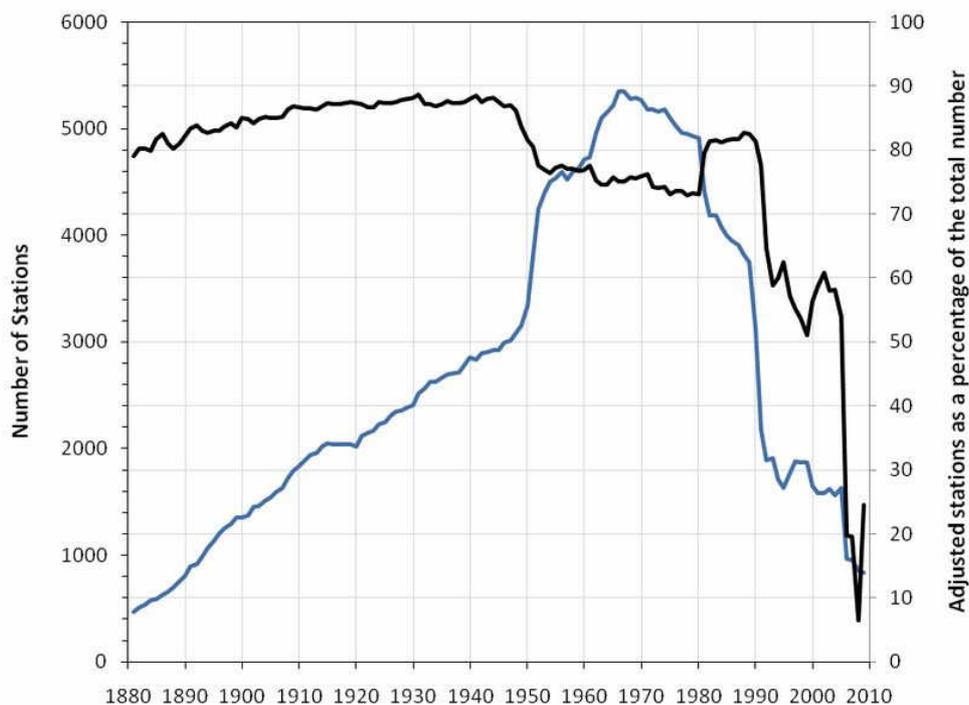


図 1-37 不自然な観測点数の減少

## (2) 気象観測点の恣意的な選択による影響

既に述べた通り、地球という面的な広がりを持つ場の気温をどのような単一の指標で評価するかは非常に難しい問題です。数学的には観測点数を無限大にすることが出来なければ「正解」は得られません。

有限の観測点で如何に全体像を的確に反映した気温の指標を得るかは大きな問題であり、気温変動傾向についてただ一つ自明な「正解」が存在するわけではないのです。

気温変動を評価する場合、仮にデータの改竄を行わなかったとしても、統計処理によって幾つもの気温変動指標を「作り出す」ことが出来るのです。

現在、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化の証拠として示されている世界気温偏差の変動は、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオを擁護する立場から作られていることを確認しておくことが必要です。

恣意的な統計処理を排除するためには、単純に地球の同一の表面積当たり均等に気温観測点を配置することが考えられます。これを面積当たりの代表値として、全体の単純平均をとることが考えられます。

しかし観測点を均等に配置することは現実的には難しいので、観測点が代表する地域の表面積を重みとした平均値をとることが考えられます。

いずれの場合においても、観測点で観測した気温がそれを代表する地域全体の気温状態を的確に代表できるものでなければなりません、その評価は難しい問題です。

例えば気象庁の発表する世界平均気温偏差は、緯度、経度を 5°毎の格子に区切り、この格子内にあるすべての観測点の気温偏差の単純平均をとってこの格子内の気温偏差の代表値と

し、緯度によって変化する格子面積を重みとして地球全体の重み付きの平均値を求めています。

日本付近の 5°格子は経線方向で 555km、緯線方向で 455km 程度です。現実的には 5°格子内の気温偏差を一つの値で適切に代表することは簡単ではありません。

さて、前回 GHCN の採用する気象観測点数の奇妙な変化について紹介しました。今回示す図 1-38 の[A]は前回示した観測点数について、観測点を地域ごとに色分けしたものです。図 1-38 の[B]は[A]の中で観測データに対して何らかの数值補正を行ったデータの数を示しています。

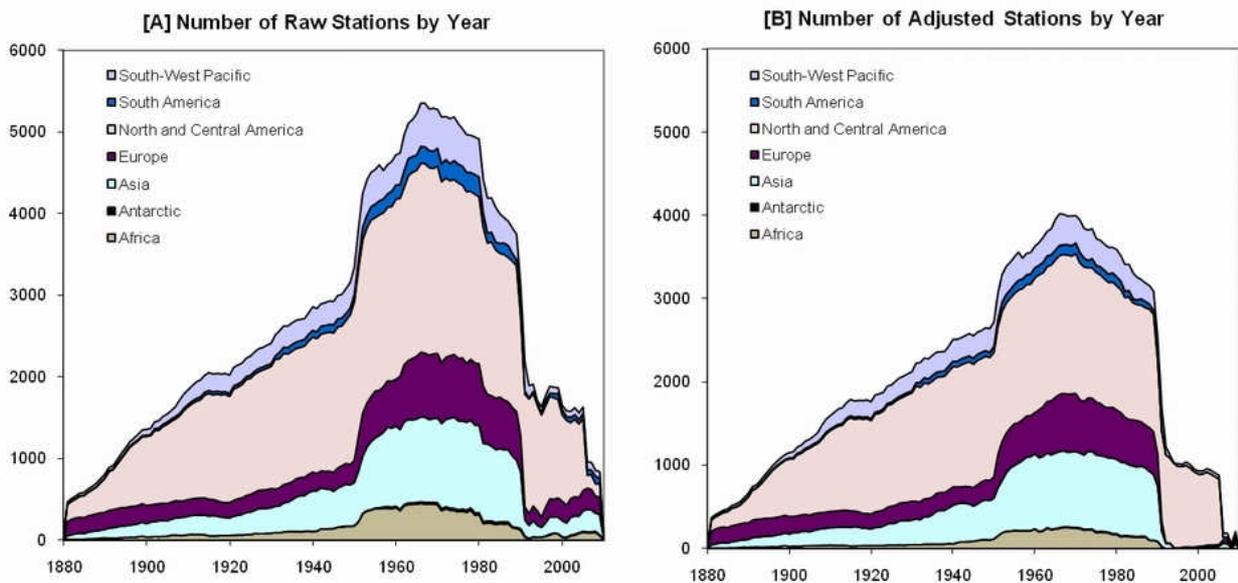


図 1-38 観測点の地域的な偏り

データの色分けは上から順に次の通りです。

- 南西太平洋地域
- 南米地域
- 北中米地域
- 欧州地域
- アジア地域
- 南極
- アフリカ地域

GHCN という組織の性質から、米国の支配地域である北中米、南西太平洋地域の観測点のデータが相対的に大きな割合を占めています。また 1945 年以後、急激に欧州地域、アジア地域、アフリカ地域の観測点数が多くなったのは第二次世界大戦が終結したことが大きな原因であろうと考えられます。

それでも、地球全体の気温の変動傾向を把握するためには、面積比から見てアジア地域、アフリカ地域の観測点数が少なすぎます。

図 1-39 に GHCN が世界気温偏差の算出に採用している気象観測ステーションの位置の分布を示します。

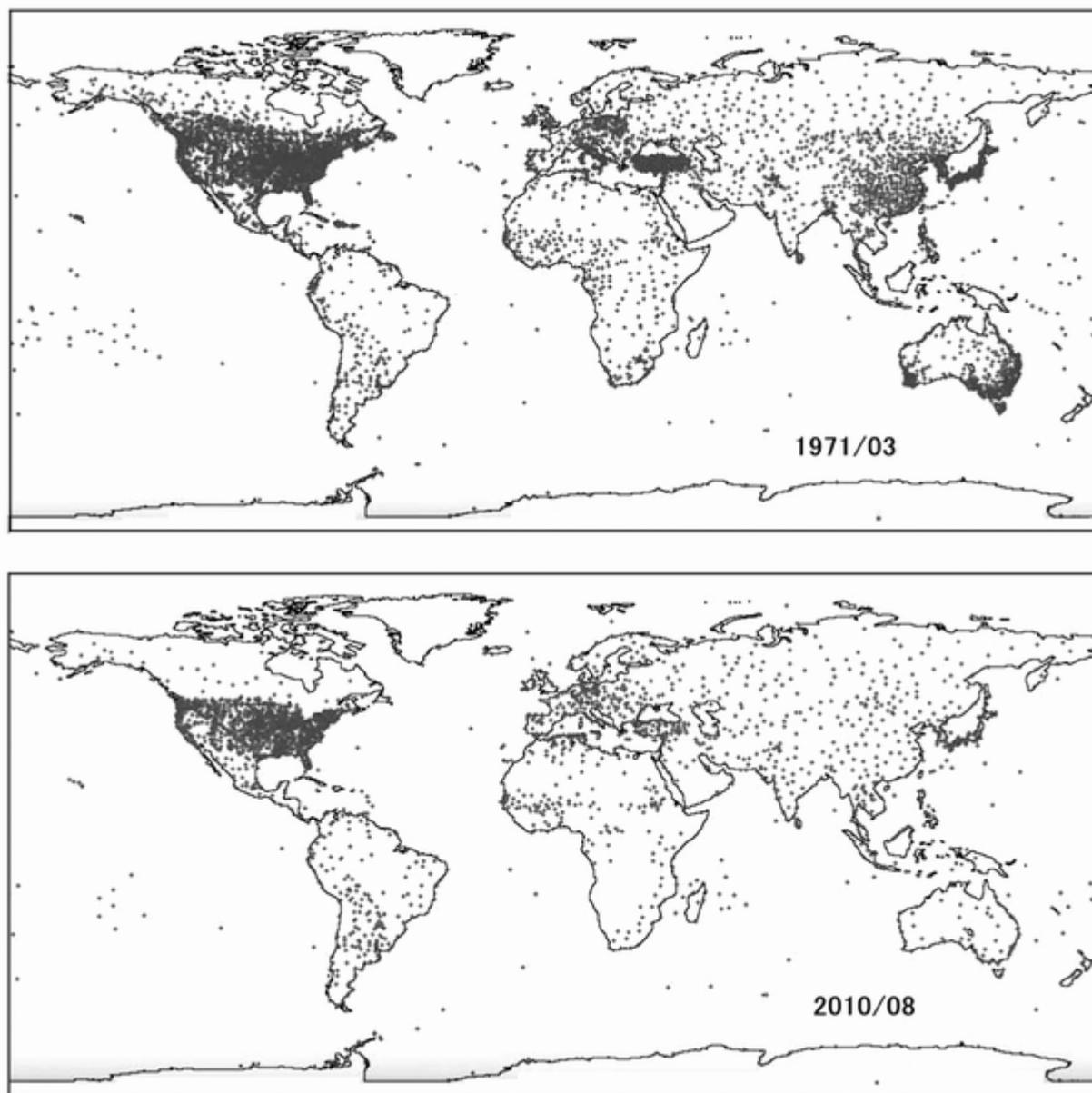


図 1-39 観測点の現象とその分布

上の図は観測点数が最大であった 1971 年の分布であり、下の図は観測点数が激減した 2010 年の分布です。

1971 年の分布では、米国の観測点数が圧倒的に多いことが分かります。次いで欧州地域、東アジア地域、オーストラリア東部地域の観測点密度が高いことが分かります。

気温の変動傾向は地域ごと、特に北半球では複雑な地形、陸海の分布などによって特殊性があるため、観測地点に極端な地域的偏りがあるのは好ましくありません。

1971 年と 2010 年の分布を比較すると、特に東アジア地域、オーストラリア東部地域では観測点数が激減していることが分かります。

気温観測データに求められる要件は、いかに代表する地域の気温状態を適切に反映しているか、という点であることは論を俟ちません。

その意味で特に注意すべき点は、局所的で特殊な環境のデータを排除することです。

近年特に重要なのが、人工的なエネルギーを集中的・大量に消費し、不透水性舗装と下水道の整備によって乾燥した地表面になっている都市部の局所的な異常昇温傾向を排除することです。

都市部の面積は、地球の全表面積に対してごく狭い範囲であり、その人工的な環境の温度状況は地球全体の温度状況と著しく異なります。

次項に示す図 1-40 の上の図は NASA/GISS (National Aeronautics and Space Administration/Goddard Institute for Space Studies) による気温データベースについて、人口 1000 万人以上の巨大都市、人口 1000 人以下の地方の田舎町、そして人口制限のない場合の気温偏差の経年変化を比較したグラフです。

これを見ると人工的な環境の影響を強く受けている巨大都市の気温偏差の変動傾向だけが全く異なることが分かります。

ただし、下の図を見ると、GISS の気温データベースにおいても Raw Data に対する「補正」が施されており、気温の上昇傾向を大きくしている可能性があるため、本当は更に巨大都市と地方の田舎町の差は大きいのかもかもしれません。

このように、都市の気温上昇傾向は地球全体の気温変動傾向を判断する場合にはできるだけ排除すべきです。

一方、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオにとって、都市化の影響を受けた場所の気温変動の方が都合がよいことが分かります。

実際には気温観測ステーションはもともと比較的に関人の多い場所に多く存在していますから、少なからず都市化の影響を受けています。自然科学的正しさからは、都市化の影響の強い場所のデータは出来るだけ排除する必要があります。

GHCN の採用する気温観測ステーション数の不自然な激減はどのような目的で行われたのでしょうか？また、時期を同じくして気温観測データに対する「補正」の割合が減少したのはなぜでしょうか？

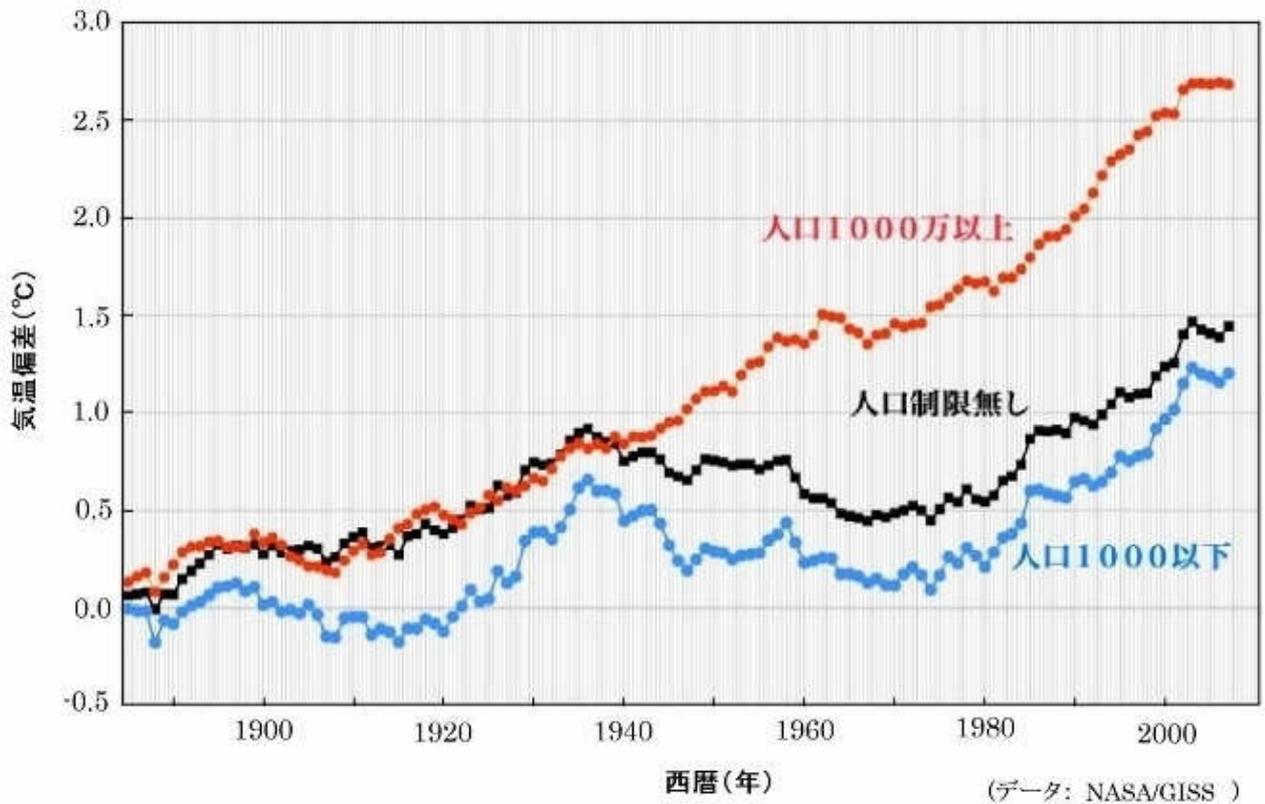
2010 年に Climategate 事件が発覚し、補正という名のデータ改竄に対して批判が出ました。そのため、GHCN ではあからさまなデータ改竄は減らし、その一方で採用する気象観測ステーションに恣意的な選択が行われました。

この際、田舎の気温観測ステーションから優先的に排除され、GHCN の採用する気温観測ステーションに占める都市部の割合が増加しました。

本来、地球全体の気温変動傾向を適切に評価するためには気温観測点数を増やし、その中から都市化傾向が強いと思われるデータを排除することが必要です。

GHCN は、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオを正当化するために、気温観測データから都市化の影響を比較的受けていない地方の田舎町の観測ステーションのデータを排除す

ることで相対的に都市化された地域の気温データの割合を高めることで、強い気温の上昇傾向を作り出しているのです。



Average temperature anomaly for Eight Paraguayan Surface Temperature Stations, comparing the Raw UCHCN data with the NASA GISS Adjusted data  
Anomaly is from the 1961-1990 raw data average for each surface temperature station

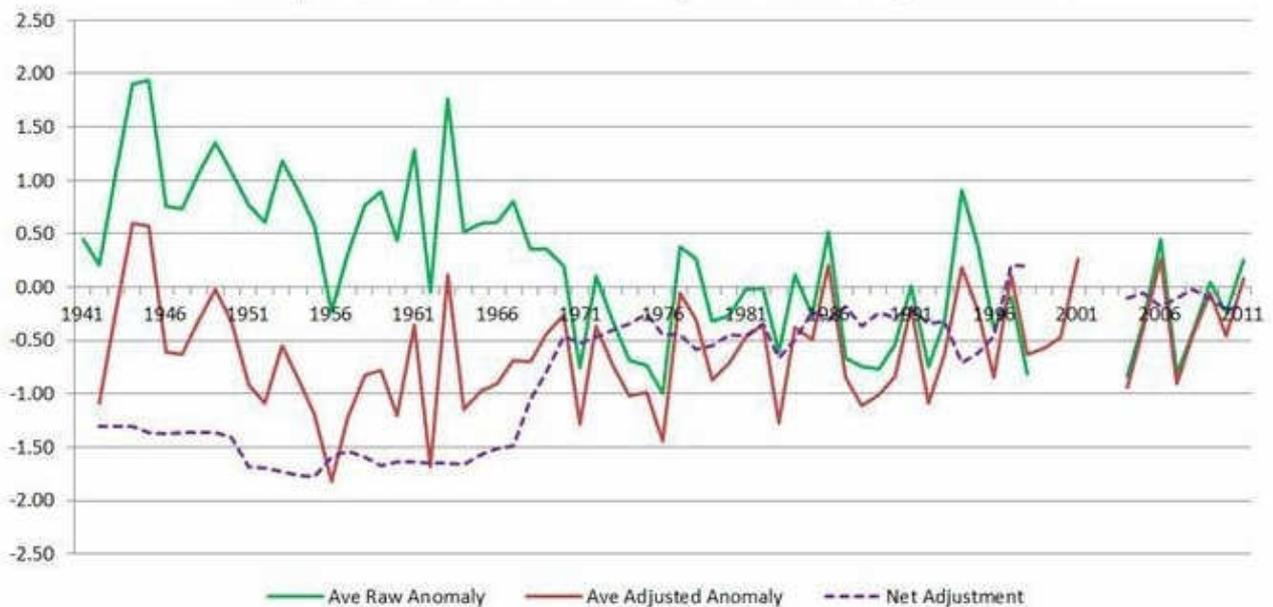


図 1-40 気温データの改竄と観測点の選別

### (3) 世界平均気温偏差の歴史的変遷

以上、世界の気温観測データの統計処理において、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオを補強するために、本来ならば自然科学的な理解を深めるためのデータに対して、どのような処理が行われているのかを紹介してきました。

図 1-41 は、GISS の世界平均気温偏差が歴史的にどのように変化してきたのかを示しています。



図 1-41 作り出された気温上昇

左側の図は、1980 年における世界平均気温偏差の経年変化を示した図です。この図では、1970 年代の寒冷化が明瞭に読み取れます。この図に示した赤のコンターと青のコンターの位置関係に注目してください。

中央の図は 1987 年における世界平均気温偏差の経年変化を示した図です。本来ならば、左側の 1980 年の図に 7 年間の追加のデータが付け加わるだけでなければなりません。

ところが、中央の図の赤と青のコンターの差は 1980 年の変動曲線に比較して小さくなっていることが分かります。つまり、過去の気温観測データに何らかのデータ改竄が行われているのです。

右側の図は 2007 年における世界平均気温偏差の経年変化を示した図です。この曲線は、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説を示すデータとして、世界平均気温偏差の経年変化を示した図として見慣れた変動傾向を示しているのではないのでしょうか？

しかしこの図は 1980 年の曲線に記した赤と青のコンターの上下関係が逆転してしまっています。つまり、2007 年のデータは 1987 年のデータよりもさらにデータに対する改竄が大きくなっているのです。

人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説では、当初から歴史的な事実である 1970 年代の世界的な気温低下傾向と矛盾することが再三指摘されてきました。

人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオを擁護したい気象学者によって、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオを補強するために、データを改竄して 1970 年代の寒冷化の事実をなかったことにしてしまったのです。

図に記載された文章：

(原文)

Those of you who still believe that the ClimateGate scandal was just a bunch of emails in England should read this article. James Hansen of GISS appears to have systematically adjusted the historical temperature record to remove a cold patch in the '70s in order to exaggerate the rise since. The amount of change of 0.6 degrees in one decade is close to the measured change for the whole century. This is vividly seen in these three snapshots of his data being modified:

Watch how the cooling trend of the 1960's to 1970's is steadily adjusted up so that 0.3 degrees cooler gradually becomes 0.03 warmer (notice the red and blue horizontal lines in the graphs above)

(訳文 : Deepl による)

クライメートゲート・スキャンダルが単なる英国の電子メールの束であったとまだ信じている人は、この記事を読むべきだ。GISS のジェイムズ・ハンセンは、70 年代以降の気温上昇を誇張するために、過去の気温記録を組織的に調整し、70 年代の寒冷期を削除したようだ。10 年間の変化量 0.6 度は、今世紀全体の変化量に近い。このことは、彼のデータが修正されている 3 枚のスナップショットを見れば一目瞭然だ：1960 年代から 1970 年代にかけての冷却傾向が、0.3 度低い気温が徐々に 0.03 度高くなるように、着実に調整されていく様子をご覧ください。（グラフの赤と青の水平線に注目してほしい）。

#### (4) Climategate 事件による自然科学の劣化

本来、自然科学とは自然界の現象を注意深く観察し、データを蓄積し、その中から普遍的な法則性を帰納する過程です。

人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説は、この自然科学的な方法論と全く異なる手段でその影響力を確立した、特異な存在です。

発端は米国議会上院における公聴会において、NASA のハンセンが彼の数値シミュレーション結果に基づいて、「異常な気温上昇の原因は 99% の確率で人為的な CO<sub>2</sub> 放出によるものである」と報告したことです。

つまり、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説は、自然現象に対する緻密な観察ではなく、コンピューターの仮想空間の中で生まれた物なのです。人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説は現実の気温変動とは多くの点で辻褄の合わない、稚拙なものです。

しかし、原子力産業をはじめとして、先進工業国の経済に大きな利益をもたらすために非常に利用価値が高かったために、瞬く間に気候変動の主要な理論として社会的に認知されることになりました。

気象研究者たちはまじめに観測データを分析するのではなく、こぞってコンピューター・シミュレーションの仮想現実に没頭しました。ついにはコンピューター・シミュレーション結果と現実が食い違う場合には「自然の方が異常である」とまで公言するようになりました。

それでも、自然科学と称する限り、いかに現実の自然現象を正しく表せるかを示すことが重大問題でした。

そこで、自然科学としてはタブーであるはずのデータ改竄が、「データ補正」という名目で大規模に開始されたのです。

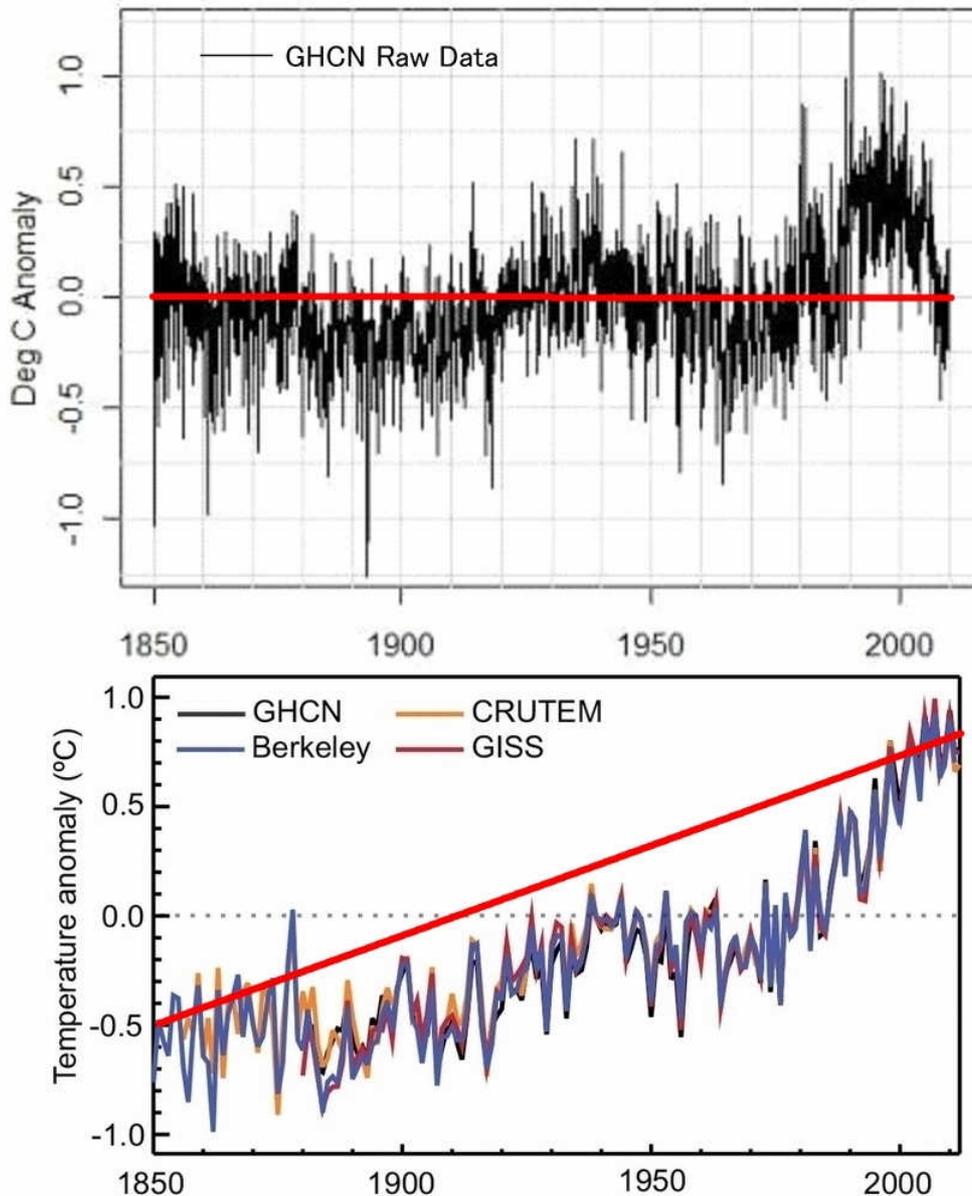


図 1-42 GHCN の観測データ(Raw Data)と調整された気温変動

再掲の図 1-42 の上の図は、GHCN の収拾する 4495 か所の気象観測ステーションの気温の Raw Data に基づく月平均気温偏差の経年変化を示しています。

1850 年の解析期間のはじめと 2010 年の気温偏差の値はいずれもほとんど「0°C」であり、顕著な気温上昇はありません。

GHCN の Raw Data による月平均気温偏差は 1850 年以降最高の値を示したのは 2000 年前後の時期であり、+0.5°C程度です。それ以後は気温は明確な低温化傾向を示しています。

これに対して下の図は全く異なる結果を示しています。GHCN と CRUTMP (Hadley Centre/Climatic Research Unit Temperature 英国気象庁ハドレーセンター)、Berkeley (米

国エネルギー省： Department of Energy バークレー研究所）、GISSによる「補正済み」の年平均気温偏差の経年変化を示したグラフです。

どの統計データも基本的に GHCN のデータベースに依存しているため、その変動傾向はほとんど同じです。GHCN の年平均気温偏差の算出では、2000 か所程度の気温観測ステーションの「補正済みデータ」を使用しています。

下の図では、1850 年と 2010 年間の気温上昇は+1.3°C程度になっています。GHCN の Raw Data と「補正済みデータ」を比較すると、+1.3°C程度の上昇傾向が「作り出され」ています。

もう一つ特徴的な違いは、Raw Data では 2000 年以後は気温は低下傾向を示しているのに対して、「補正済みデータ」は気温上昇が継続している点です。

GHCN の年平均気温偏差は、元になる同一の Raw Data を使用しながら、数値的な「補正」を行い、採用する気温観測ステーションを恣意的に選択することによって、産業革命以降の人為的な CO<sub>2</sub> 放出量の増加に伴って気温が上昇するという人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化仮説のシナリオを正当化する目的で、ここまで大きな差を作り出しているのです。

GHCN のデータは、日本の気象庁を含めて多くの国の研究機関や自然科学者によって利用されています。気象科学の最も基本的な基礎データである気温データが改竄されることで、気象科学全体の信頼性が揺らいでいます。

## 1-7 結論～固体地球と表面環境の共変化

以上、太陽系の惑星としての地球誕生から現在までの地球環境の変化について、主にその気温変化に着目して概観してきました。

地球は約 46 億年前に誕生して以降、一貫してその内部に保有している熱エネルギーを宇宙空間に放出しながら冷却を続けています。これが地球環境変化の本質的な原因です。

地球が放熱し冷却されたことで、40 億年ほど前に海洋が誕生しました。地球を取り巻いていた水蒸気  $H_2O$  と二酸化炭素  $CO_2$  を主体とする原始地球大気が、量的、質的に現在の地球大気に近い組成に飛躍的な変化した原因が海洋の誕生でした。

海洋の誕生によって 300 気圧を超える原始地球大気が数気圧にまで劇的に薄く透明になりました。その過程で、大気の主要な構成要素であった水蒸気が雨となって地球に降り続け、同時に水に溶けた  $CO_2$  が大気から取り除かれました。その後、海中の熱水噴出孔の周辺で生命が誕生しました。

地球表面が冷却されることで、上部マントルの外縁部分が硬化し、固体地球の表面全体が剛体的なプレートに覆われました。プレートテクトニクスの開始です。プレートは上部マントルの対流によって移動し、プレート境界では一方のプレートが沈み込み帯から上部マントルに沈み込み、下部マントルとの境界にその残骸が蓄積しました。沈み込まなかった方のプレートではプレート境界付近に陸地が形成されました。

27 億年ほど前に、プレートの巨大な残骸＝メガリスが下部マントル中を外核の表面まで崩落しました。低温のメガリスが液体鉄の外核を冷却して温度の不均衡が生まれ、これを原因として液体鉄の外核に対流運動が生じ、強い地球磁場が誕生しました。

有害な宇宙線が地球磁場に捉えられ(バンアレン帯)地球表面まで届かなくなったために、海生生物は浅海にまで進出しました。その中から、光合成をおこなう生物が誕生しました。光合成生物が誕生したことで、地球環境に酸素  $O_2$  の供給が始まりました。

プレート境界付近では陸地が面積を広げ、マントル中のプルームの数が減少すると同時に巨大化しました。マントルの下降流は最終的に単一の巨大なスーパーコールドプルームに集約され、すべての小大陸がスーパーコールドプルームに向かって移動を開始し 19 億年ほど前に最初の超大陸ヌーナが出来ました。

超大陸形成のクライマックスでは、プレートの移動速度が小さくなり、地球の内部熱の放出が極小化し、地表面環境は寒冷化し、氷河期 (Huronian 氷期 : 24-21 億年前) になりました。

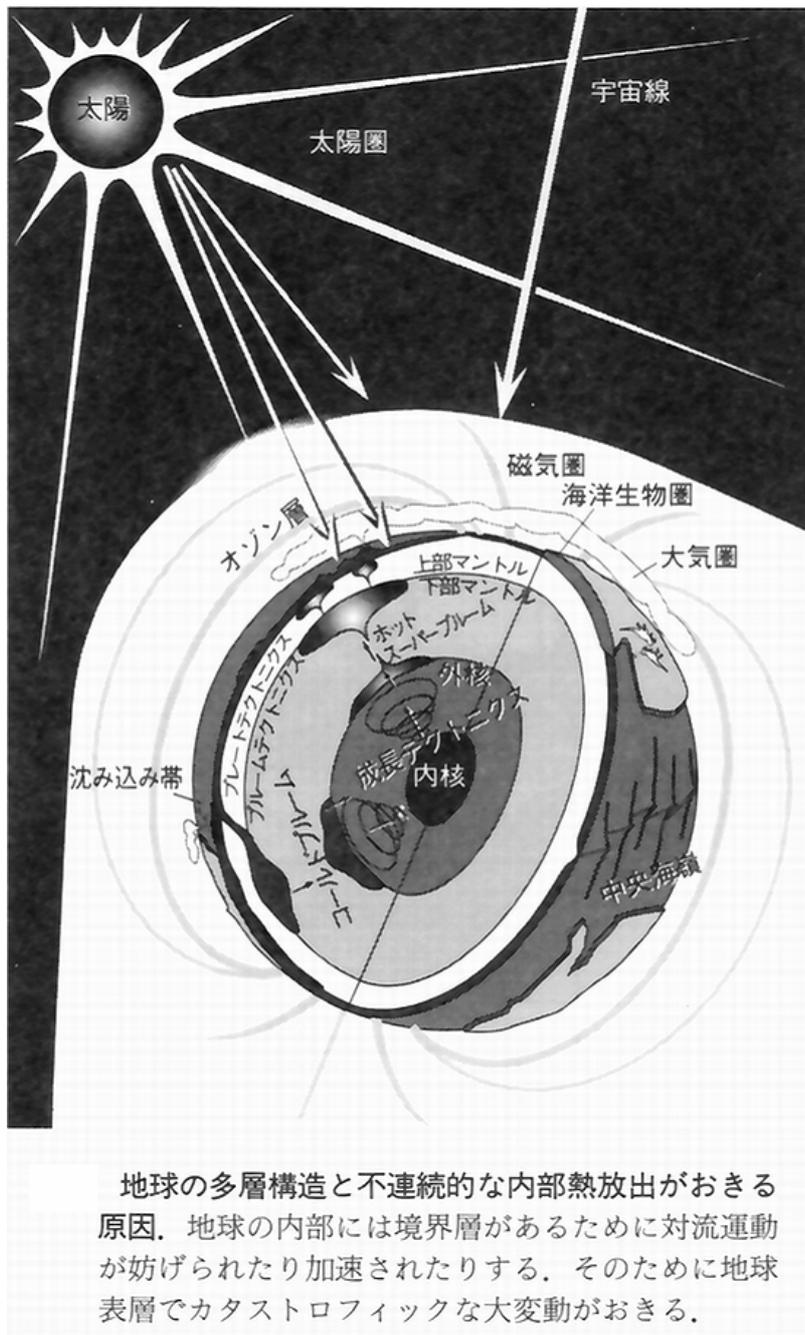
やがて全地球規模でマントルオーバーターンが起こり、超大陸の下にスーパーホットプルームが誕生し、上部マントルの温度が急激に上昇しました。激しい火成活動を伴って超大陸の分裂が開始しました。激しい火成活動、上部マントルの活発化によって地表面環境には地球の内部熱が急速に供給され、地表面環境の気温は急上昇すると同時に、火成活動による環境の大激変が起こりました。

27 億年前以降は、超大陸の形成・分裂の周期的変動＝ウィルソンサイクルに伴って、温暖

な時期と寒冷な氷河期が繰り返されています。現在は3億年ほど先の超大陸アメイシアの形成に向かっており、300万年ほど前から氷河期に入っています。

その後も、地球は内部熱を放出しながら冷却を続け、上部マントルの冷却が進み、10億年ほど前から海洋プレートに含まれた海水がマントル中に逆流し始めました。その結果、上部マントルの流動性が大きくなりました。一方、海水は減少し続けています。海水の消滅は地球生態系の消滅だと考えられています。

海生生物の光合成によって、地表面環境に $O_2$ が供給され続け、大気中の $O_2$ 濃度の上昇によってオゾン層が形成され、生物に有害な紫外線がほとんど地表面まで到達しなくなり、6-5億年ほど前には陸上にまで生物圏が広がりました。



このように、固体地球の変動が本質的な原因となって地球の表面環境は変化しています。海洋が生まれ、生物が生まれ、光合成生物が生まれることなどを通して生態系の存在が逆に表面環境を変化させています。

地球史的に見て、温暖な時期と氷河期という極端な二つの環境変化の原因は、地表面から外核表面までを貫く固体地球の間歇的な変動に支配されています。

この固体地球の変動に伴って、生態系を含む表面環境は常に受動的にこれに適応しているのです。

私たちの関心の中心は、氷河期における気温変動機構についてです。

氷河期では、地球の内部エネルギーの放出量が極小化しており、表面環境の温度状態を決定する主要な熱源は主星である太陽からの放射エネルギーです。

地球の多層構造と不連続的な内部熱放出がおきる原因。地球の内部には境界層があるために対流運動が妨げられたり加速されたりする。そのために地球表層でカタストロフィックな大変動がおきる。

図 1-43 地球の多層構造と環境の激変

地球は直近の 100 万年程度の期間は、約 10 万年の周期で本来の寒冷な氷期と、氷河期においては例外的に比較的暖かい束の間の間氷期を繰り返しています。その原因は、ミランコビッチ・サイクルという、惑星としての地球が太陽を巡る公転運動の軌道要素が周期的に変動することで太陽放射に対する受光能力が変化することによって生じています。この氷期-間氷期の気温差は 10°C を超える程度と考えられています。

現在の地球は「完新世」と呼ばれる間氷期にあります。比較的温暖な間氷期にあっても 5°C 程度の振幅を持つかなり激しい周期的な気温変動があります。

この原因は主に主星である太陽自身の活性度の変動に起因して、地球に到達する放射や太陽風の強さなどが変動することによって起きています。

つまり、地球の氷河期の気温変動の主因は、惑星としての地球の軌道要素の変動であり、次いで太陽の活性度の変動です。

近年の CO<sub>2</sub> 地球温暖化説に見られるように、地球大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変動による大気の温室効果、正確には赤外活性の変動が地球の主要な気温変動要因の一つという主張があります。しかしそれは非常に考えにくいことです。

これまで見てきた原始海洋が出来て以降の地球の温暖期と氷河期という大局的な気温変動において、CO<sub>2</sub> の大気中濃度と気温との間には明確な因果関係を認めるような現象は確認されていません。

勿論、地球大気に赤外活性があることは気温を決定する上で重要な要素です。しかし、地球大気の主要な赤外活性気体は水蒸気 H<sub>2</sub>O であり、水蒸気と雲によって地表面からの赤外線放射の 9 割以上が捕捉されています。

CO<sub>2</sub> は主に 15μm 付近のごく狭い範囲の赤外線だけを吸収しています。この波長帯域の大部分は水蒸気の吸収帯域と重複しており、CO<sub>2</sub> 濃度の変動の影響は極めて限定的だからです。

現在の氷河期においてもミランコビッチ・サイクルに伴う気温変動を原因として、結果として大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が従属的に変動する現象は南極氷床の分析から確認されていますが、CO<sub>2</sub> 濃度の変動によって気温が変動するという現象は確認されていません。

以上を総括すると、地球の気温を決定する上で重要な要素は、次の通りです。

- ① 固体地球の変動による地球内部熱の宇宙空間への放熱速度の変動。
- ② 太陽系の惑星としての地球の公転運動の軌道要素の変動に伴う地球の太陽放射に対する受光能力の変動、
- ③ 太陽自身の活性度の変化。

## 2. 人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説の科学

1 章では、地球誕生から現在までの地球史的な視点から気候変動を概観してきました。

地球史的な視点から見ると、現在は確認されている範囲で 5 度目の氷河期の最中にあります。幸い氷河期では例外的に比較的暖かい間氷期が 10000 年程続いています。

この 10000 年ほど継続している間氷期＝完新世の気温は 7000 年ほど前に最高温期を示し、3000 年ほど前からはおよそ 1000 年周期で気温極大期を示しながら全般的に気温は低下傾向を示しています。

過去の人類史から、完新世の温暖期は文明的に繁栄していたことが記録されています。20 世紀終盤～現在はちょうど 1000 年毎に繰り返されている気温極大期に当たります。地球史的には取り立てて大きな変化のない平穏な状態です。

一方、人間社会では、政治・経済的な理由から、産業革命以降の温暖化傾向が継続して気温上昇が 2°C を超えると地球の生態系は破滅的な打撃を受けるとして危機感を煽っています。これを真に受けたスウェーデンの若い女性は「地球は燃えている」と言い、若者たちの危機感を煽っています。政治家や大企業は彼女のカリスマ性を利用し、世界中の若者たちは彼女の言動を自然科学的に検証することもなく盲信しています。

この人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説の狂騒状態は全世界的規模で自然科学が政治・経済によって利用されるという危険な状態です。

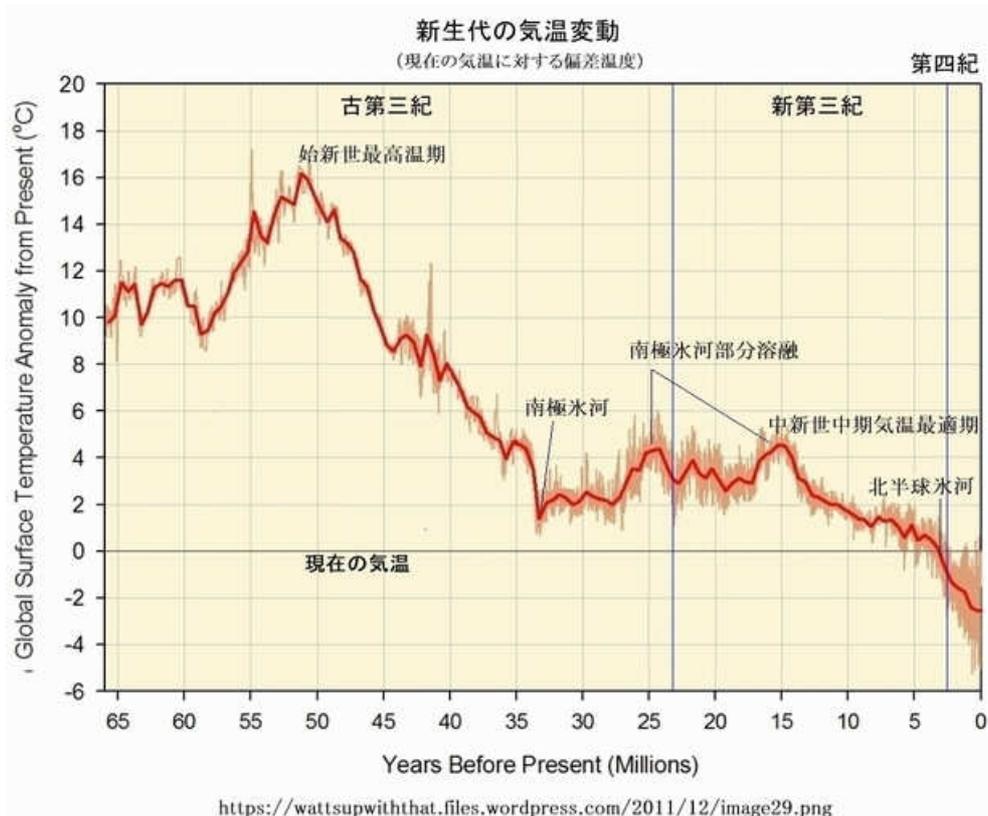


図 2-1 新生代の気温変動

地球史的に見れば、現在は恐竜が絶滅した後、哺乳類の適応放散が起こった新生代の中で最も寒冷な時期であり、300 万年ほど前には北半球でも氷河が発達し始め氷河期に入っています。

現在は氷河期の中では比較的温暖な間氷期ですが、高山や両極には氷河がある紛れもない氷河期です。

人類史が残るこの間氷期＝完新世においても 3000 年ほど前からは 1000 年程度の周期で気温極大期を示しながらも気温は低下傾向を続けています。

完新世で最も寒冷な時期の一つであった小氷期(14 世紀中盤～19 世紀中盤)の終盤に興った産業革命からの気温上昇が 2°Cを超えることで地球の生態系が高温で危機的な状況になるという国連気候変動枠組み条約締約国会議パリ協定の前提条件、あるいは IPCC の主張は歴史的・科学的に見て不合理です。そこには、実質的な環境危機による影響を危惧するのではない、何らかの別の意図があると考えられます。

2 章では人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説を自然科学的に検証することにします。

## 2-1 CO<sub>2</sub>濃度上昇の主因は気温上昇

### (1) 地球表面環境の炭素循環

1章で見たように、地球大気に含まれる二酸化炭素 CO<sub>2</sub> 量は地球に原始海洋が出来て以降も長期的に減少傾向が続いています。光合成生物が登場すると大気中の CO<sub>2</sub> を消費して酸素 O<sub>2</sub> が生産されました。その結果、現在の大気中の O<sub>2</sub> 濃度は 20%程度にまで上昇しています。その一方で大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は 300~400ppm (1ppm=1/1000000) 程度と地球史的には最低レベルになっています。

現在の地球生態系は、光合成による CO<sub>2</sub> 吸収量と呼吸や炭水化物の分解に伴う CO<sub>2</sub> 放出量がほぼ均衡する状態です。光合成と呼吸、大気と海洋との無機的な CO<sub>2</sub> 交換等をまとめた地表面環境における炭素循環の概要を IPCC2007 年報告書の図で示します。

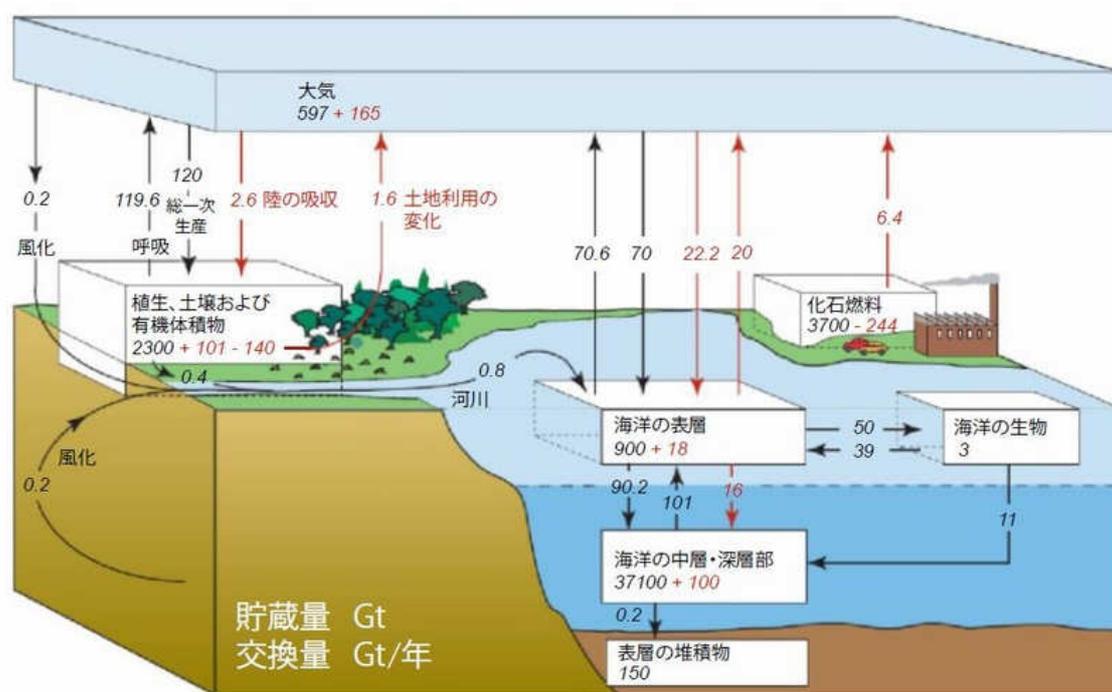


図 2-2 IPCC2007 年炭素循環図

図 2-2 の矢印は 1 年間あたりの移動量を示し、四角内の数値はストック量を示しています。黒の文字は産業革命以前の数値を示し、赤の文字は産業革命から現在までの増加量を示しています。

産業革命以前の炭素循環(単位:炭素重量 Gt=10<sup>9</sup> t)の概要は以下の通りです。

- 地表面環境からの CO<sub>2</sub> 放出量 : (119.6+70.6)Gt/年 = 190.2Gt/年
- 地表面環境の CO<sub>2</sub> 吸収量 : (0.2+120+70)Gt/年 = 190.2Gt/年
- 大気中の CO<sub>2</sub> 量 : 597Gt

大気中の CO<sub>2</sub> 量 597Gt に対して CO<sub>2</sub> の年間循環量は 190.2Gt/年なので、単純には (597/190.2)年 = 3.1388 年で大気中の CO<sub>2</sub> の大部分が入れ替わることになります。厳密には 10 年間で 95%程度が入れ替わります(後述)。

CO<sub>2</sub>は大気中に放出された瞬間に元々大気中に存在していたCO<sub>2</sub>と混合します。大気中に存在するCO<sub>2</sub>について、大気中に放出された時期や放出源毎に区別することは出来ません。

「人為的CO<sub>2</sub>蓄積説」は、産業革命以降(200年間にわたって)人為的に放出したCO<sub>2</sub>の半分程度が大気中に蓄積し続けたことが産業革命以降の大気中CO<sub>2</sub>濃度上昇の原因だと主張しています。これは二つの点で不合理です。

第一に、炭素循環図で分かるように、大気中のCO<sub>2</sub>は地表面環境との間で絶えず循環しているために10年も経過するとほとんどが入れ替わってしまうため、「蓄積し続ける」ことはありません。

第二に、大気中のCO<sub>2</sub>は放出源毎に区別できないため、人為的に放出されたCO<sub>2</sub>だけが選択的に大気中に蓄積することはありません。

以上から、「人為的CO<sub>2</sub>蓄積説」は自然科学的に成り立たない仮説です。

もう少し検討を進めます。図2-2から産業革命以前から現在までのCO<sub>2</sub>放出の増加量を以下に示します。

- 海洋からのCO<sub>2</sub>放出の増加量 :20.0Gt/年(71.4%)
- 土地利用の変化に伴うCO<sub>2</sub>放出の増加量 :1.6Gt/年(5.7%)
- 化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>放出の増加量 :6.4Gt/年(22.8%)

以上から、産業革命以後の大気中CO<sub>2</sub>濃度上昇の最大の原因は海洋からのCO<sub>2</sub>放出量の増加だと推定されます。

## (2) CO<sub>2</sub>循環モデル

IPCCによる炭素循環図に示された数値を基に「人為的CO<sub>2</sub>蓄積説」が自然科学的に成り立たないことを示しました。

ここでは、CO<sub>2</sub>循環の数値モデルを使って、もう少し定量的に議論を行うことにします。

初期の離散的表現のCO<sub>2</sub>循環モデルは、物理学会誌 Vol. 62, No. 2, 2007 に掲載された槌田敦のレポート「CO<sub>2</sub>を削減すれば温暖化は防げるのか」の中で示されました。

[https://www.env01.net/main\\_subjects/global\\_warming/contents/s002/tutida01.pdf](https://www.env01.net/main_subjects/global_warming/contents/s002/tutida01.pdf)

関連部分を以下に引用します。

(引用開始)

IPCCによれば、大気中のCO<sub>2</sub>の量は約730ギガトンであるが、毎年約120ギガトン陸と交換し、約90ギガトン海と交換している。つまり、大気中CO<sub>2</sub>は毎年30%が入れ替わり、大気中に残るのは70%である。

人間が毎年排出するCO<sub>2</sub>についても、その30%は陸と海に吸収され、70%が大気中に残る。この量はCO<sub>2</sub>温暖化説で大気中に溜まるという55.9%よりも多い。

しかし、今年溜まった70%の人為的CO<sub>2</sub>がいつまでも大気中に残ることはない。去年の分は70%の70%、つまり49%しか残っていない。一昨年分は70%の70%の70%、つまり34.3%しか残っていない。

この人為的CO<sub>2</sub>の大気中に溜まる量の最大値は、

$$0.7 + (0.7)^2 + (0.7)^3 + \dots = \frac{0.7}{1-0.7} = 2.33$$

と簡単に計算できて、人為的排出で溜まる CO<sub>2</sub> の量は最大でも 2.33 年分でしかない。

(引用終わり)

註) 2.33 年分は前年度末の残留量であり、離散的表現のモデルでは当年分を加えると最大で 3.33 年分が大気中に存在すると考えられる。(近藤)

この植田によって示された 1 年毎の離散的表現の炭素循環の数学モデルを連続的な表現に拡張することにします。

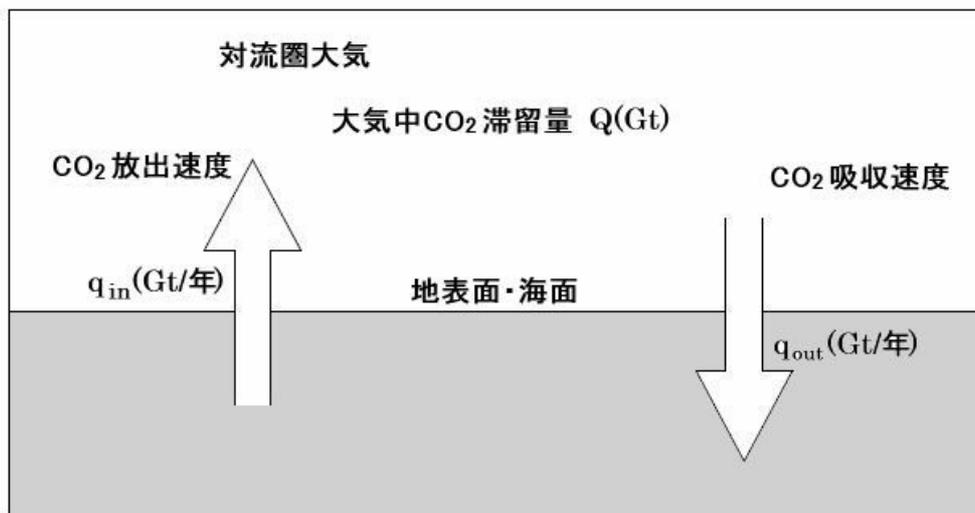


図 2-3 CO<sub>2</sub> 循環モデル

図 2-3 に示す炭素循環を微分形式で表すことにします。大気中に存在する CO<sub>2</sub> 量を  $Q(\text{Gt})$ 、地表面環境から大気へ放出される CO<sub>2</sub> 量を  $q_{in}(\text{Gt/年})$ 、地表面環境が大気から吸収する CO<sub>2</sub> 量を  $q_{out}(\text{Gt/年})$ 、 $Q$  に対する地表面環境の CO<sub>2</sub> 吸収量  $q_{out}$  の割合を年間吸収率  $r$  で表すことにします。つまり、

$$r = \frac{q_{out}}{Q} \quad (1/\text{年})$$

今、有限の短い時間  $\Delta t$  の間の大気中の CO<sub>2</sub> 量  $Q$  の変化量を  $\Delta Q$  とすると次の式が成り立ちます。

$$\Delta Q = (q_{in} - q_{out})\Delta t = (q_{in} - r \cdot Q)\Delta t$$

$\Delta t \rightarrow 0$  の極限をとることで次式で示す  $Q$  に対する線形一次微分方程式を得ることが出来ます。

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} = q_{in} - q_{out} = q_{in} - r \cdot Q \quad \therefore \frac{dQ}{dt} + r \cdot Q = q_{in}$$

$r$ 、 $q_{in}$ を定数とし、 $t=0$ の $Q$ の初期値を $Q_0$ とした場合の一般解は次式で表すことができます。

$$Q(t) = \frac{q_{in}}{r} + \left( Q_0 - \frac{q_{in}}{r} \right) e^{-rt}$$

大気中の $CO_2$ 量の変化は十分遅いと考えられるため、炭素循環の性状を把握するためには上式に対して( $t \rightarrow \infty$ )の極限值=定常解を使って検討することにします。定常解は次の通りです。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left\{ \frac{q_{in}}{r} + \left( Q_0 - \frac{q_{in}}{r} \right) e^{-rt} \right\} = \frac{q_{in}}{r} = Q = const., \quad q_{in} = q_{out}$$

これは、離散的な表現の $CO_2$ 循環モデルと同じ結論であることが分かります。

この検討では、IPCC2007年報告の現在の数値を用いて検討することにします。吸収率 $r$ の値は下記の通りです。

$$r = \frac{218.2 \text{ Gt/年}}{762 \text{ Gt}} = 0.2864 (1/\text{年})$$

$Q$ の一般解を使って時刻ゼロにおいて大気中に存在していた炭素量 $Q_0$ がどのように減少するのかを求めた残存率の変化を下の図に示します。

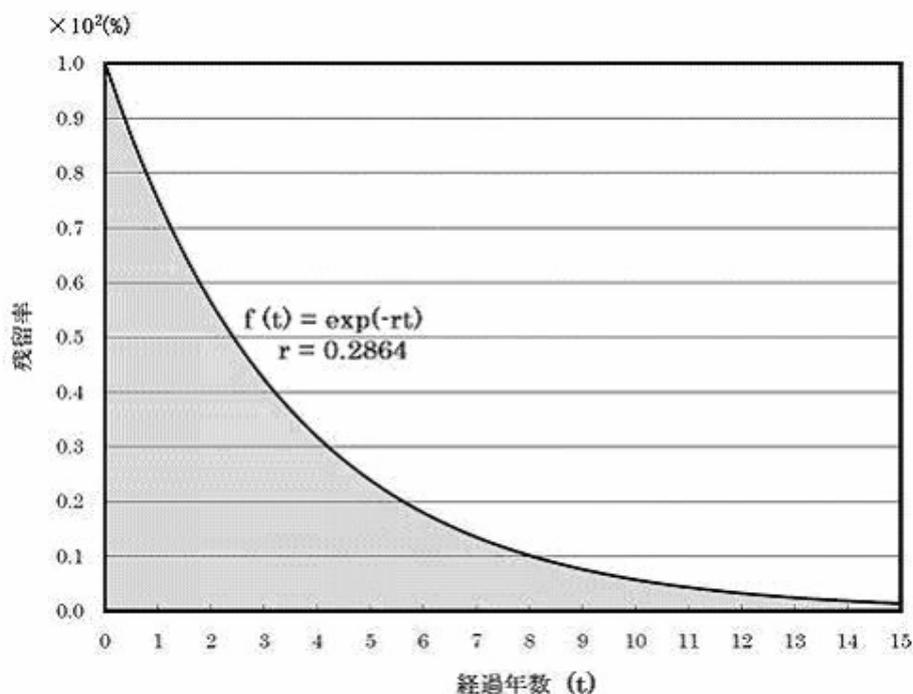


図 2-4  $Q_0$ の残存率の経年変化

具体的に  $t=10$  年後の残存率を計算すると以下の通りです。

$$10\text{年後の残留率} = f(10) = \frac{Q_0 \cdot e^{-r \cdot 10}}{Q_0} = e^{-2.864} = 0.057 = 5.7\%$$

当初大気中に存在していた  $\text{CO}_2$  の 10 年後の残存率は 5% 程度に減少すると述べたのはこのことを指しています。

次に循環モデルの定常解を使って、IPCC2007 年報告の炭素循環図の大気中に存在する  $\text{CO}_2$  量を分析することにします。

今、複数の  $\text{CO}_2$  放出源がある場合、次の式が成り立ちます。

$$Q = \frac{1}{r}(q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n) = \frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^n q_i$$

放出源  $i$  からの大気中  $\text{CO}_2$  量に対する寄与を  $Q_i$  とすると次式で表すことができます。

$$Q_i = \frac{q_i}{r}$$

これを用いて分析した結果を次の表に示します。

	放出量(Gt/年)		大気中 $\text{CO}_2$ 量(Gt)				
	工業化前	増加量	工業化前	吸収率変化	放出量増	合計増加量	現在
呼吸	119.6	0.0	375.4	42.3	0.0	42.3	417.7
海洋	70.6	20.0	221.6	25.0	69.8	94.8	316.4
化石燃料	0.0	6.4	0.0	0.0	22.4	22.4	22.4
土地利用	0.0	1.6	0.0	0.0	5.6	5.6	5.6
合計	190.2	28.0	597.0	67.2	97.8	165.0	762.0

表 2-1 IPCC2007 年炭素循環図の分析結果

表 2-1 の要点を整理しておきます。

地表面環境の大気からの年間  $\text{CO}_2$  吸収率  $r$  は、

$$\text{工業化前} \quad r = \frac{190.2}{597} = 0.3186$$

$$\text{現在} \quad r = \frac{190.2 + 28}{762} = 0.2864$$

に減少しました。地表面環境からの  $\text{CO}_2$  放出量に変化しなくても、 $r$  の効果だけで、大気中の  $\text{CO}_2$  量は 67.2Gt(吸収率変化の合計)増加しています。

次に、工業化前から現在までの  $\text{CO}_2$  放出増加量 28Gt の内訳を見ておきます。海洋からの増加量 20Gt が圧倒的に大きいことが分かります。これによって大気中  $\text{CO}_2$  量は 69.8Gt 増加しています。年間吸収率  $r$  の効果と合わせると、海洋による大気中  $\text{CO}_2$  増加量は 94.8Gt になります。

これに対して化石燃料の燃焼による人為的な CO<sub>2</sub> 放出量の増加は 6.4Gt であり、大気中 CO<sub>2</sub> の増加量は 22.4Gt です。

したがって、現在の大気中 CO<sub>2</sub> 量 Q の中で人為的に放出した CO<sub>2</sub> による寄与の割合は次の通りです。

$$\frac{22.4}{762} = 0.0294 = 2.94\%$$

現在の大気中 CO<sub>2</sub> 量 Q に対する化石燃料の燃焼による CO<sub>2</sub> 放出の影響は 3%にも満たないことが分かります。

現在の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を 400ppm とすると、人為的な CO<sub>2</sub> は

$$400 \times 0.0294 = 11.8 \text{ ppm}$$

産業革命当時の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は 280ppm 程度であったと考えられています。現在の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を 400ppm とすると、増加量は 120ppm です。したがって、産業革命以後の CO<sub>2</sub> 濃度上昇量 120ppm に対する人為的に放出した CO<sub>2</sub> の影響は

$$\frac{11.8}{120} = 0.098 = 9.8\%$$

1割程度であることが分かります。

残りの 9割は自然変動です。具体的には、海洋と大気間の無機的な CO<sub>2</sub> 交換量が増加したこと、地表面環境の CO<sub>2</sub> 吸収率 r の低下が大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇の主因です。

つまり、産業革命以後の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇の主要な原因は自然現象であって、人為的な影響は 1割程度にすぎません。人間社会からの CO<sub>2</sub> 放出を抑制する脱炭素社会が実現しても、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度をほとんど下げることが出来ません。

仮に、CO<sub>2</sub> 温暖化説が正しいとしても、人為的な CO<sub>2</sub> 放出量をゼロにして削減できるのは 3%、12ppm 程度であり、ほとんど温暖化対策としての効果はありません。

### (3) Keeling 曲線に対する考察

C. D. Keeling は、ハワイの Mauna Loa の観測所と南極サウスポールの観測所における大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の連続精密観測の結果をもとに、CO<sub>2</sub> 濃度の観測値から長期的な増加傾向を取り除くことで、気温変動と短期的な CO<sub>2</sub> 濃度変動の関係を示した図 2-5、俗称「Keeling 曲線」を発表しました。

(Keeling, C.D., et al., 1989, 'A three-dimensional model atmospheric CO<sub>2</sub>', Peterson, D.H. (ed.), "Aspects of Climate Variability", AGU Monogr., 55(1989)165-363)

日本では根本順吉氏が著書「超異常気象(1994年)」において Keeling 曲線を紹介しました。

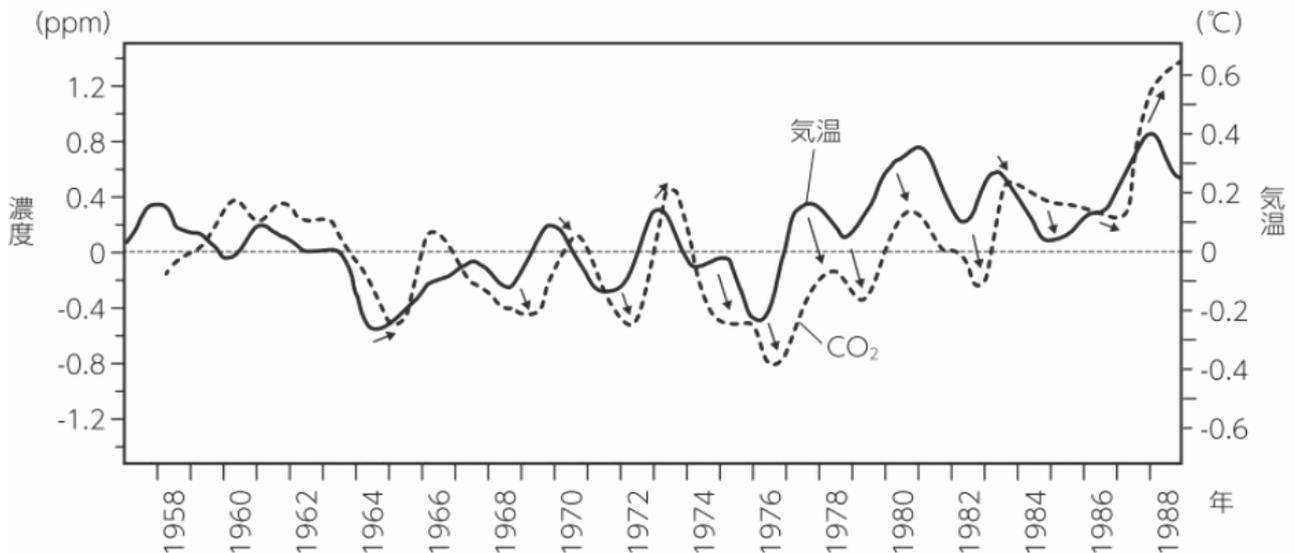


図 2-5 Keeling による大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の短期変動と気温変動

この Keeling 曲線に対して、気象学会誌「天気」に対して読者から気温の変動が大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を変化させているのではないかという疑問が寄せられました。人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説を支持していた気象学会にとっては都合の悪いことでした。気象学会はこれを放置することもできず、気象学会誌『天気』2005 年 6 月号に気象庁気象研究所の河宮未知生による「回答」を掲載しました。

(引用開始)

回答：問題とされている図に関してまず注意しなければいけないのは、質問中でも指摘されている通り、二酸化炭素の長期的な上昇傾向が除いてあるという点です。地球温暖化の原因となるのは正にこの長期的上昇傾向です。それが取り除かれたこの図で表されているのは自然起源の変動であり、人間活動に端を発する地球温暖化とは比較的関連の少ないものと言えます。

(引用終わり)

この河宮の主張は、気象学会公認である「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」に基づいていました。

河宮は Keeling が気温と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の二者関係を明確に示すために取り除いた「長期的な CO<sub>2</sub> 濃度の上昇傾向＝人為的に放出した CO<sub>2</sub> が大気中に蓄積したもの」であると主張しました。

「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」（例えば、東京大学 IR3S/TIGS 叢書 No.1「地球温暖化懐疑論批判」議論 18；pp42-43）では、自然の CO<sub>2</sub> 循環と人為的に放出した CO<sub>2</sub> 循環は全く別の挙動を示すと主張しています。

「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」は自然の CO<sub>2</sub> 循環は量的に変化しても地表面環境の放出量と吸収量が常に均衡するために大気中の CO<sub>2</sub> 量に変化を与えないと主張します。

しかし、CO<sub>2</sub> 循環モデルからは、例え自然の CO<sub>2</sub> 放出であっても、地表面からの CO<sub>2</sub> 放出  $q_{in}$  が大きくなると大気中の CO<sub>2</sub> 量  $Q$  が大きくなり、その結果として地表面の CO<sub>2</sub> 吸収量  $q_{out}$  が増加して平衡状態が回復します。

更に、実際の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の観測値には季節変動に伴う光合成の活性度に同期した 1 年周期の変動、Keeling 曲線に見られる気温変動に追従する数年周期の変動が明瞭に表れています。自然起源の CO<sub>2</sub> の変動が大気中の CO<sub>2</sub> 量を変化させていることは明らかです。

自然の CO<sub>2</sub> 循環が変動しても大気中の CO<sub>2</sub> 量は変わらないという「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」の主張は誤りです。

一方、「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」は人為的に放出した CO<sub>2</sub> は、自然起源の CO<sub>2</sub> とは混合せず、放出した初年度に半分程度が地表面環境に吸収され、残りの半分程度は半永久的に大気中に蓄積し続けると主張します。

しかし既に見たように、自然起源の CO<sub>2</sub> はもともと大気中に存在していた CO<sub>2</sub> と混合して CO<sub>2</sub> 濃度を変化させます。これは「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」と論理的に矛盾する結果です。CO<sub>2</sub> 循環モデルが主張するように一旦大気中に放出された CO<sub>2</sub> は混合して放出時期や放出源によって区別できないと考えるほかありません。

したがって、産業革命以降の長期的な大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇量の 9 割程度は自然変動であって、人為的な影響は 1 割程度です。Keeling が取り除いた長期的変動の大部分は自然変動です。

また、河宮は取り除いた長期的な CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が地球温暖化と関係していると述べています。しかし、Keeling 曲線は、「地球温暖化」を含んだ気温偏差と長期的な上昇傾向を取り除いた数年周期の CO<sub>2</sub> 濃度の変動の関係を示しています。Keeling 曲線に対する河宮の主張は論理的に破綻しています。

付け加えると、CO<sub>2</sub> 濃度の長期的な上昇傾向と気温偏差を求める基準となる気温とが関係していると推認されます。これは後に詳細に検討します。

Keeling 曲線は、気温変動に大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変動が追従していることを示しているのです。つまり気温変動が原因となって大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変動を引き起こすことを示唆していると考えられます。

#### (4) 化学平衡から考える大気中 CO<sub>2</sub> 濃度

ここでは、なぜ環境の温度が上昇することで海水中から大気への CO<sub>2</sub> 放出が増加して大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が増加するのかを化学の視点から考察します。

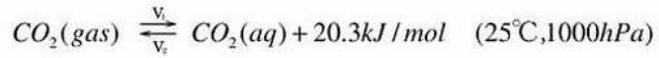
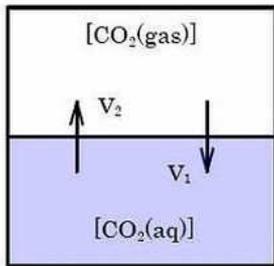
気体の水に対する溶解反応について考えることにします。

気体の温度とは気体分子の平均的な運動エネルギーの指標です。気体の絶対温度を  $T$ 、ボルツマン定数を  $k$ 、気体分子の質量を  $m$ 、平均気体分子速度を  $v$  とすると次の式が成り立ちます。

$$T = \frac{2}{3k} \cdot \frac{mv^2}{2}$$

気体温度  $T$  は気体分子の運動エネルギー  $\frac{mv^2}{2}$  に比例します。

温度が高いほど気体分子は大きなエネルギーを持ち高速で運動します。温度の高い気体ほど水に捉えられにくくなり、水に溶けている気体は水温が高いほど大気中に逃げ出しやすくなります。したがって、一般に気体は気温が高いほど水に溶けにくくなります。



$$v_1 = k_1[CO_2(gas)] \quad v_2 = k_2[CO_2(aq)]$$

$$\text{速度定数} \quad k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \doteq C_1 T + C_2$$

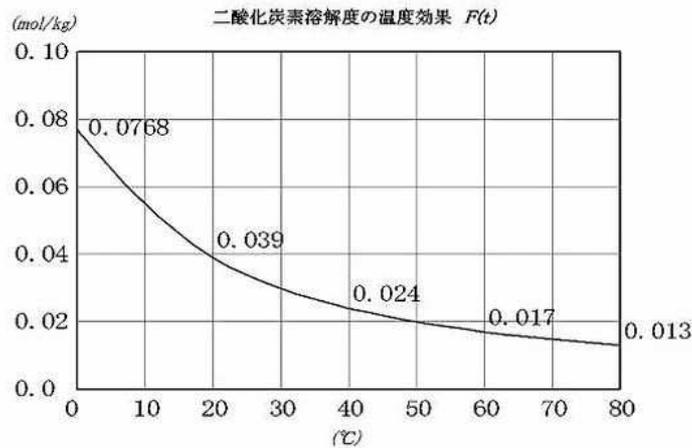


図 2-6 CO<sub>2</sub>の水への溶解反応

図 2-6 に示す CO<sub>2</sub> を含んだ空気と水で構成された系を考えます。空気中の CO<sub>2</sub> 濃度を [CO<sub>2</sub>(gas)]、水中の CO<sub>2</sub> 濃度を [CO<sub>2</sub>(aq)] で表すことにします。

CO<sub>2</sub> の水への溶解反応（右向きの矢印）は発熱反応です。平衡状態では、空気中の CO<sub>2</sub> が溶解する速度  $v_1$  と水中の CO<sub>2</sub> が空気中に放出される速度  $v_2$  が等しくなります。速度定数をそれぞれ  $k_1$ 、 $k_2$  で表すと次の式が成り立ちます。

$$v_1 = k_1 \cdot [CO_2(gas)] = k_2 \cdot [CO_2(aq)] = v_2$$

速度定数  $k$  は一般的に反応系の温度  $T$  の関数になります。狭い温度範囲であれば  $T$  の一次関数と考えて差し支えありません。

$$k_1(T) = C_{11} \cdot T + C_{12}$$

$$k_2(T) = C_{21} \cdot T + C_{22}$$

ここに、 $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{21}$ 、 $C_{22}$  : 定数

平衡状態にある系に熱を加えて温度を  $\Delta T$  だけ上昇させるとル・シャトリエの法則から温度上昇を緩和する方向に平衡状態が遷移します。CO<sub>2</sub> の水への溶解反応は発熱反応なので、系の温度が上昇すると吸熱反応（発熱反応の逆方向の反応）が進みます。したがって水中の CO<sub>2</sub> が大気中に放出されます。この時の反応速度は次の関係が成立します。

$$v_1 + \Delta v_1 = k_1(T + \Delta T) \cdot [CO_2(gas)] < k_2(T + \Delta T) \cdot [CO_2(aq)] = v_2 + \Delta v_2$$

$$\therefore \Delta v_1 = \Delta k_1 \cdot [CO_2(gas)] < \Delta k_2 \cdot [CO_2(aq)] = \Delta v_2$$

ただし、

$$\Delta k_1 = C_{11} \cdot \Delta T, \quad \Delta k_2 = C_{21} \cdot \Delta T$$

したがって、気温がステップ関数的に  $\Delta T$  上昇した時の  $CO_2(gas)$  の増加速度は次式で示すように  $\Delta T$  の一次関数で表すことができます。

$$\Delta v_2 - \Delta v_1 = \Delta k_2 \cdot [CO_2(aq)] - \Delta k_1 \cdot [CO_2(gas)] = \{C_{21} \cdot [CO_2(aq)] - C_{11} \cdot [CO_2(gas)]\} \Delta T \geq 0$$

水中からの  $CO_2$  放出が続くと空気中の  $CO_2$  濃度  $[CO_2(gas)]$  が次第に大きくなり、水中の  $CO_2$  濃度  $[CO_2(aq)]$  が次第に小さくなります。そして再び  $v_1=v_2$  となり、新たな平衡状態になります。

このように、 $CO_2$  の水への溶解反応が発熱反応なので気温が上昇すると海洋からの  $CO_2$  放出速度が  $CO_2$  の吸収速度よりも速くなり、大気中の  $CO_2$  濃度が増加します。

したがって、「人為的  $CO_2$  蓄積説」が主張する「自然の  $CO_2$  循環は放出量=吸収量なので大気中の  $CO_2$  濃度を変化させない」という主張は化学反応論から誤りです。大気中の  $CO_2$  濃度が増加することによって放出速度と吸収速度が等しくなることで平衡状態を回復しているのです。

## 2-2 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度に対する榎田－近藤の分析

前節で見てきた通り、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説の本質的な成立要件である「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」は自然科学的に不可能な主張です。

しかし、気象研究者たちは政治的・経済的な要請から自然科学的な論証を避け、Climategate 事件に見られるように、反対意見を封殺してきました。日本でも日本気象学会は人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説に異を唱える榎田敦の主張の発表機会をはく奪するという暴挙を繰り返し行いました。

熱物理学者である榎田敦は物理学の立場から自然科学的に不合理な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」に意義を申し立てました。環境経済・政策学会、物理学会、気象学会において気温と CO<sub>2</sub> 濃度の関係分析から「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」が誤りであることを主張しました。

ここでは物理学会誌掲載論文と気象学会誌「天気」への投稿論文の基礎となった榎田と私の分析過程の概要を紹介します。

私と榎田はまず、根本順吉氏が紹介した C. D. Keeling が彼の観測結果をもとに発表した大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の短期変動と気温偏差の関係を示した Keeling 曲線について、検証することから開始しました。

Keeling 曲線は大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の観測結果から物理・化学的に不明瞭な「長期的な上昇傾向」を取り除くという処理を行いました。そしてその取り除いた「長期的な上昇傾向」に対して明確な解釈を示しませんでした。

このことが後に気象学会誌「天気」の河宮の回答に見られる誤った解釈を許す余地を残すことになりました。

そこで、私と榎田は「長期的な上昇傾向」を取り除くことなく、気温変動が大気中 CO<sub>2</sub> 濃度変動よりも先行して起こることを示すことから始めました。

私たちの分析過程を示す前に、前節で紹介した CO<sub>2</sub> 循環モデルと化学反応速度論から、可能な大気中 CO<sub>2</sub> 濃度モデルを提示することにします。

### (1) 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度モデルの構築

ここでは、前節で確認したように、産業革命以後の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇の大半が海洋からの CO<sub>2</sub> 放出の増加などの自然変動であるという事実に基づいてモデルを構築します。

CO<sub>2</sub> 循環モデルの基礎的な関係は次式で表すことができます。

$$\frac{dQ(t)}{dt} = (q_{in} - q_{out})$$

産業革命以後の CO<sub>2</sub> 濃度上昇の主因は海洋からの CO<sub>2</sub> 放出量の増加です。CO<sub>2</sub> の水に対する溶解反応から、空気中から水に溶解する速度を  $v_1$ 、水から空気中に放出される速度を  $v_2$  とすると次の関係が成り立ちます。

$$q_{in} = c \cdot v_2 \quad , \quad q_{out} = c \cdot v_1 \quad , \quad c : \text{定数}$$

$v_1, v_2$ は、温度  $T$  の変動幅が小さい場合はそれぞれ温度  $T$  の 1 次関数で実用上十分な精度で近似することができます。したがって  $(q_{in} - q_{out})$  は形式的に温度  $T$  に関する 1 次関数として次のように表現できます。

$$q_{in} - q_{out} = c \cdot (v_2 - v_1) = c_1 \cdot T + c_2 \quad (c, c_1, c_2 : \text{定数})$$

ここまでは無機的な海洋と大気との  $\text{CO}_2$  循環を考えてきましたが、自然の  $\text{CO}_2$  循環でもう一つの重要な要素は光合成と呼吸という生物反応です。

光合成をはじめとする生物反応は気温が高いほど活発だと考えられるため、無機的な  $\text{CO}_2$  循環と同様に気温  $T$  の一次関数によって近似出来ます。

したがって、大気と海洋の  $\text{CO}_2$  循環と光合成-呼吸による  $\text{CO}_2$  循環を合わせて、第一近似として上式の表現を使用することが出来ます。

上式は単位時間当たりの大気中の  $\text{CO}_2$  量  $Q$  の変化量を表しています。上式を時間  $t$  で積分することで大気中の  $\text{CO}_2$  量  $Q(t)$  を求めることが出来ます。 $Q(t_0) = Q_0$  として、

$$Q(t) = \int_{t_0}^t \frac{dQ(t)}{dt} dt = \int_{t_0}^t (q_{in} - q_{out}) dt = Q_0 + \int_{t_0}^t \{c_1 \cdot T(t) + c_2\} dt = Q_0 + c_1 \cdot \int_{t_0}^t T(t) dt + c_2 \cdot t$$

図 2-7 に  $Q(t)$  の模式図を示します。

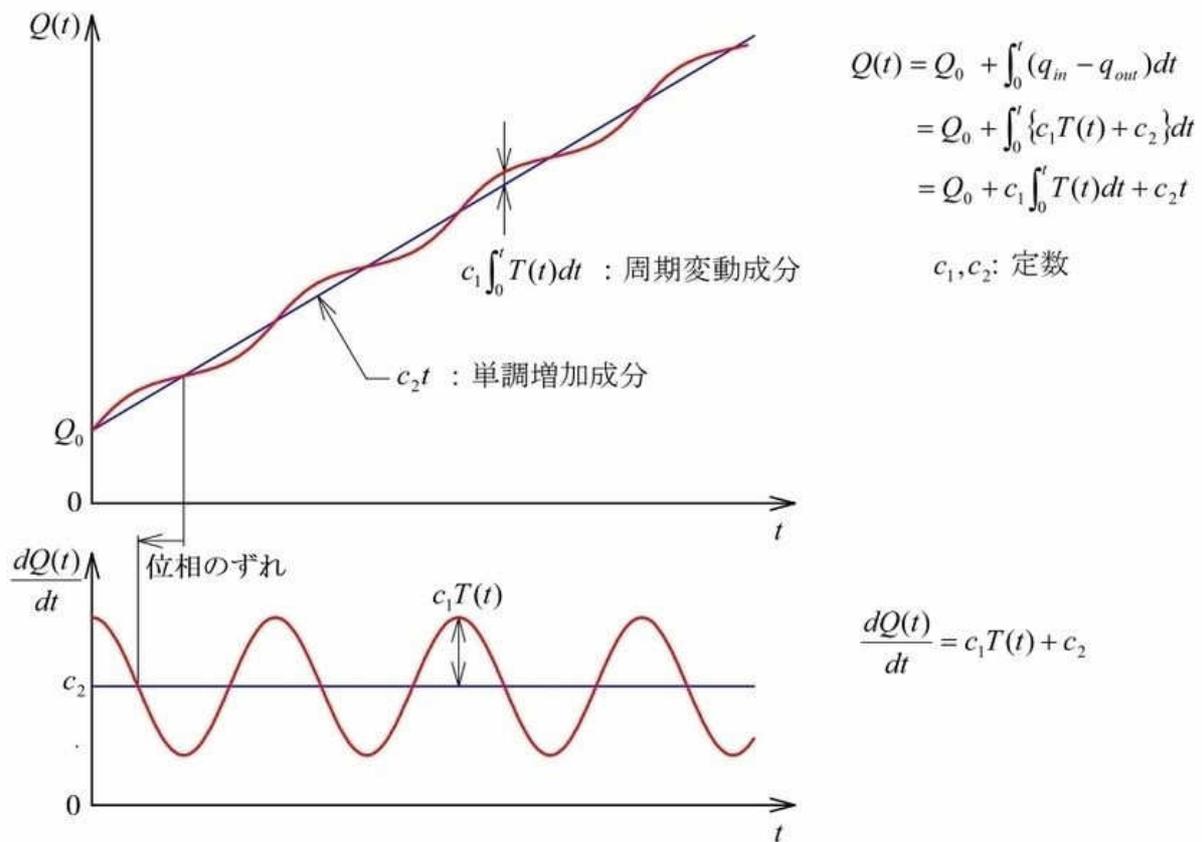


図 2-7 大気中  $\text{CO}_2$  量  $Q(t)$  の数値モデル

大気中  $\text{CO}_2$  濃度は高々 300~400ppm 程度と低濃度なので、大気中  $\text{CO}_2$  量  $Q(t)$  に比例す

るとして差し支えありません。大気中  $\text{CO}_2$  濃度を  $F(t)$  とすると比例定数を  $C$  として  $F(t)=C \cdot Q(t)$  で表すことが出来ます。 $F(t)$ の変動曲線は  $Q(t)$ と相似形になります。

ここで、実際の観測値との対応から、時刻  $t$  における温度  $T(t)$ は観測期間の平均気温からの偏差温度とします。したがって、 $T(t)$ は  $T=0$  の周辺で変動する関数になります。

周期的な変動関数を積分すると、位相が  $1/4$  周期だけ遅れます。例えば、 $\cos$  関数を積分すると  $\sin$  関数になります。

したがって、気温変動に同期して変動する  $dQ(t)/dt$  を時間  $t$  で積分することによって求められる大気中  $\text{CO}_2$  濃度  $Q(t)$ は気温変動から  $1/4$  周期遅れて変動することになります。

## (2) 大気中 $\text{CO}_2$ 濃度と気温の経年変化

Keeling 曲線では、大気中  $\text{CO}_2$  濃度の観測値から「長期的な上昇傾向」を取り除くことによって微細な変動を分かりやすくしました。

ここでは「長期的な上昇傾向」を取り除く前の大気中  $\text{CO}_2$  濃度の観測値そのものと気温の変動（世界月平均気温偏差）を図 2-8 に示します。

大気中  $\text{CO}_2$  濃度、世界月平均気温偏差のいずれも、季節変動などの微小な変動を取り除くために 13 か月の移動平均値を使用しています。

大気中  $\text{CO}_2$  濃度は  $100\text{ppm}$  のオーダーで小さいため、大気中  $\text{CO}_2$  量  $Q(t)$ に比例すると考えて問題ありません。大気中  $\text{CO}_2$  濃度の変動曲線  $F(t)=C \cdot Q(t)$  は  $Q(t)$  と相似形の変動を示します。

大気中  $\text{CO}_2$  濃度については、1969 年の当初の観測値を原点に、その後の変動量を示しています。これは大気中  $\text{CO}_2$  量  $Q(t)$ において  $Q_0$  を差し引いた場合と同じです。

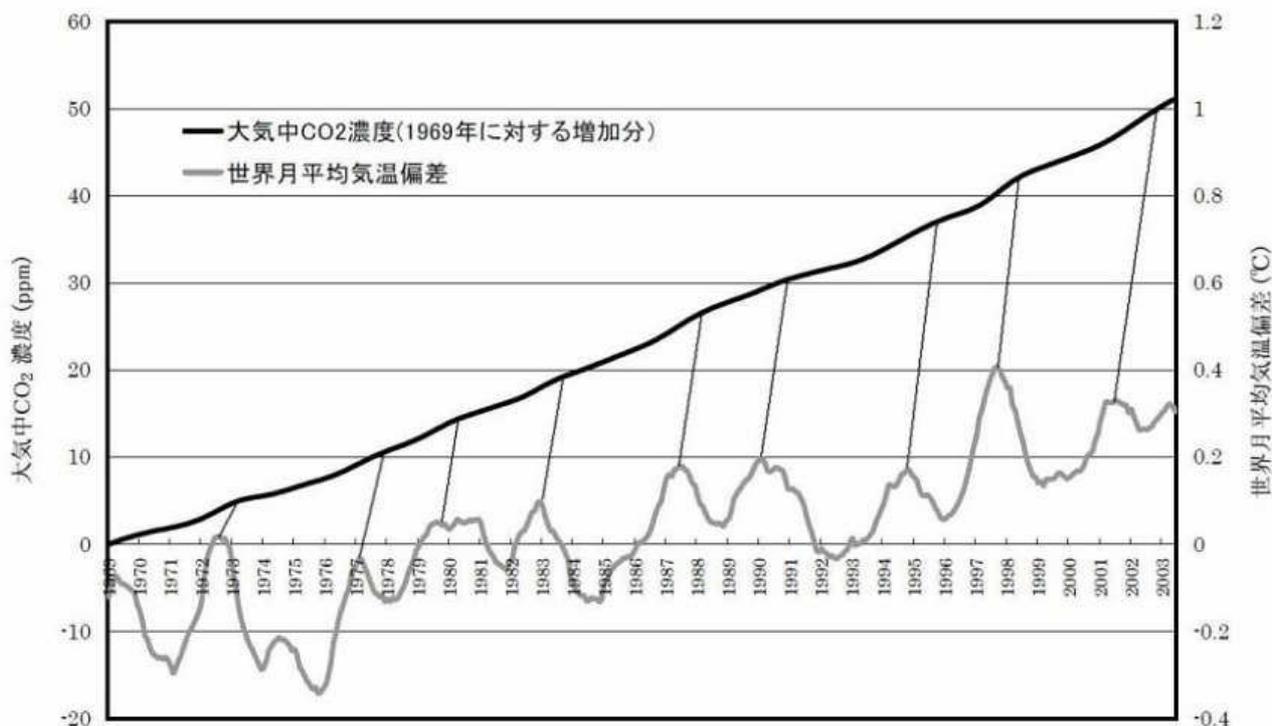


図 2-8 大気中  $\text{CO}_2$  濃度と世界月平均気温偏差の経年変化

世界月平均気温偏差は、観測期間の平均からの偏差温度を示しています。

図2-8に示した大気中CO<sub>2</sub>濃度と世界月平均気温偏差の関係は、数値モデルの大気中CO<sub>2</sub>量  $Q(t)$ と  $c_1 \cdot T(t)$ の関係とよく似ていることが分かります。

細い実線は、世界月平均気温偏差の変動曲線の極大値を示す点と、これに対応する大気中CO<sub>2</sub>濃度の変動曲線上の点を結んだものです。

世界月平均気温偏差の変動曲線と大気中CO<sub>2</sub>濃度変動曲線を注意深く見ると、世界月平均気温偏差の変動に少し遅れて大気中CO<sub>2</sub>濃度が同じように変動していることが分かりますが、このままではわかりにくいのは確かです。

Keeling 曲線のCO<sub>2</sub>濃度の変動曲線は、数値モデルの大気中CO<sub>2</sub>量  $Q(t)$ から「 $c_2 \cdot t$ 」に対応する「長期的な上昇傾向」を取り除くことで、 $\int c_1 \cdot T(t) dt$  に関わる変動成分だけを取り出して示したものであると考えることが出来ます。

### (3) 気温の時間変化率と大気中CO<sub>2</sub>濃度の時間変化率

大気中CO<sub>2</sub>濃度の数年周期の変動傾向を明確にするためにKeelingは「長期的な上昇傾向」を取り除きました。この操作によって、確かに数年周期の変動傾向は明確になりましたが、取り除いた「長期的な上昇傾向」に関する情報が失われてしまうことになりました。

これが後に気象学会誌「天気」の河宮の回答のような誤った解釈の余地を残すことになりました。

私は「長期的な上昇傾向」を取り除くことなくKeeling 曲線と同じように気温と大気中CO<sub>2</sub>濃度の変動の間の位相差を示すことにしました。

関数の変動傾向を明らかにするためには、関数の微分係数、つまり曲線勾配や曲率を求めることが行われます。

私は大気中CO<sub>2</sub>濃度について時間変化率、正確には一年間当たりの変化率を求めることで、大気中CO<sub>2</sub>濃度を表す曲線の勾配を求めることにしました。

大気中CO<sub>2</sub>濃度の数年周期の変化を明らかにするために一年間当たりの変化率を求めることは、大気中CO<sub>2</sub>濃度を表す時間  $t$  の関数に対して時間  $t$  について微分操作を行うことと等価であり、位相が1/4周期だけ進むこととなります。

いま行おうとしているのは、Keeling 曲線に示されている気温と大気中CO<sub>2</sub>濃度の変動の位相差を別の方法で再現することです。そこで、気温＝世界平均気温偏差についても一年間当たりの変化率を求めることで位相を1/4周期だけ進めることで比較することにしました。結果を図2-9に示します。

大気中CO<sub>2</sub>濃度と気温偏差の双方について微分操作を行うことによって、「長期的な上昇傾向」を取り除くことなくKeeling 曲線が示したと同様に、まず気温が変動し、それに少し遅れて大気中CO<sub>2</sub>濃度の変動が起きていることが確認できます。

世界平均気温偏差は平均値＝0°Cの周辺で変動する関数なので、その時間変化率も0(°C/年)の周辺で変動することになります。

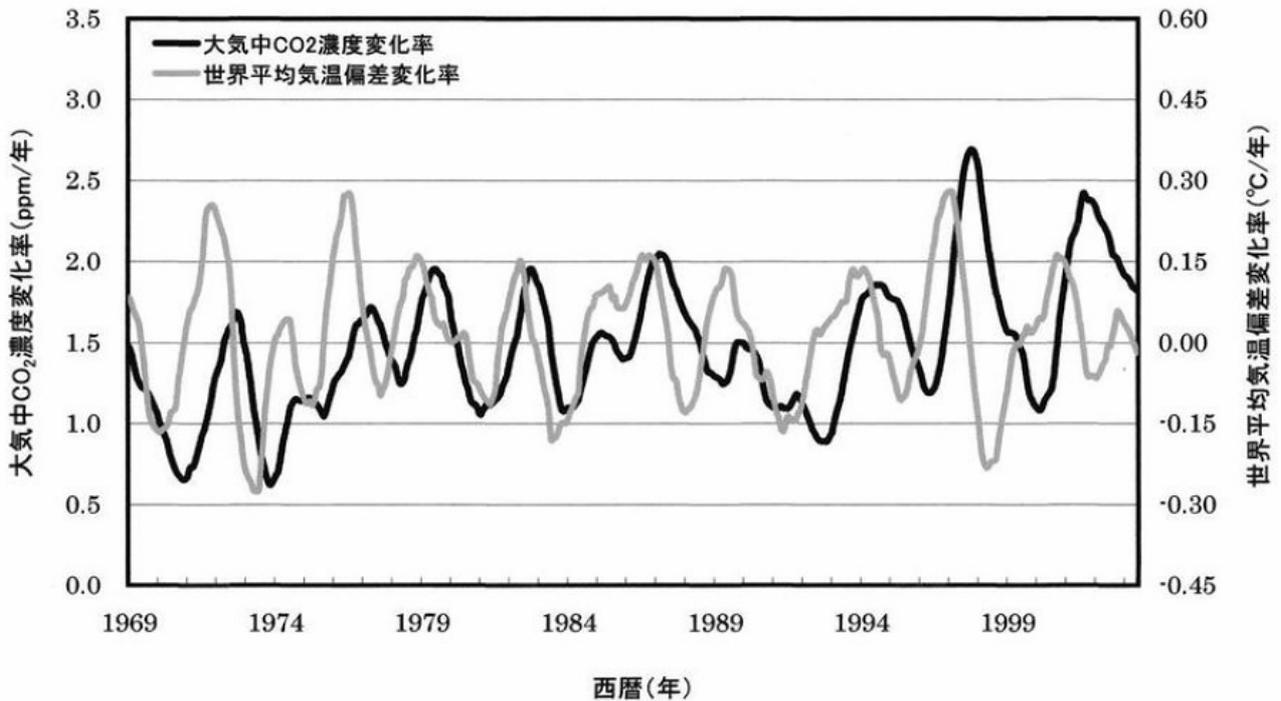


図 2-9 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度変化率と世界平均気温偏差変化率の経年変化

これに対して大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は約 1.5 (ppm/年) の周辺で変動していることに注意してください。これは、観測期間において大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は平均的に年率約 1.5ppm ずつ上昇することを示しています。これが大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の「長期的な上昇傾向」の正体です。大気中 CO<sub>2</sub> 量  $Q(t)$  を求めるための被積分関数「 $c_1 \cdot T(t) + c_2$ 」の定数  $c_2$  に対応するのが 1.5 (ppm/年) です。

#### (4) 気温と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率

前項の分析から、Keeling 曲線が示したのと同様に、気温変動に少し遅れて大気中 CO<sub>2</sub> 濃度に変動することが確認できました。

更に、Keeling 曲線では失われてしまった情報であった「長期的な上昇傾向」とは、観測期間の平均気温において年率 1.5ppm 程度の継続的な大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が起きていることであることが分かりました。

大気中 CO<sub>2</sub> 濃度モデルを再掲します。

$$F(t) = C \cdot Q(t)$$

$F(t)$  の時間  $t$  についての微分を求めると次の通りです。

$$\frac{dF(t)}{dt} = C \cdot \frac{dQ(t)}{dt} = C \cdot (c_1 \cdot T + c_2) = C_1 \cdot T(t) + C_2$$

ただし、 $C_1 = C \cdot c_1$ 、 $C_2 = C \cdot c_2$  : 定数

したがって、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度  $F(t)$  は気温  $T(t)$  の一次関数なので気温  $T(t)$  と同期するはずで

これを確認するために、世界平均気温偏差と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率を同じ時間軸にプロットした図 2-10 を示します。

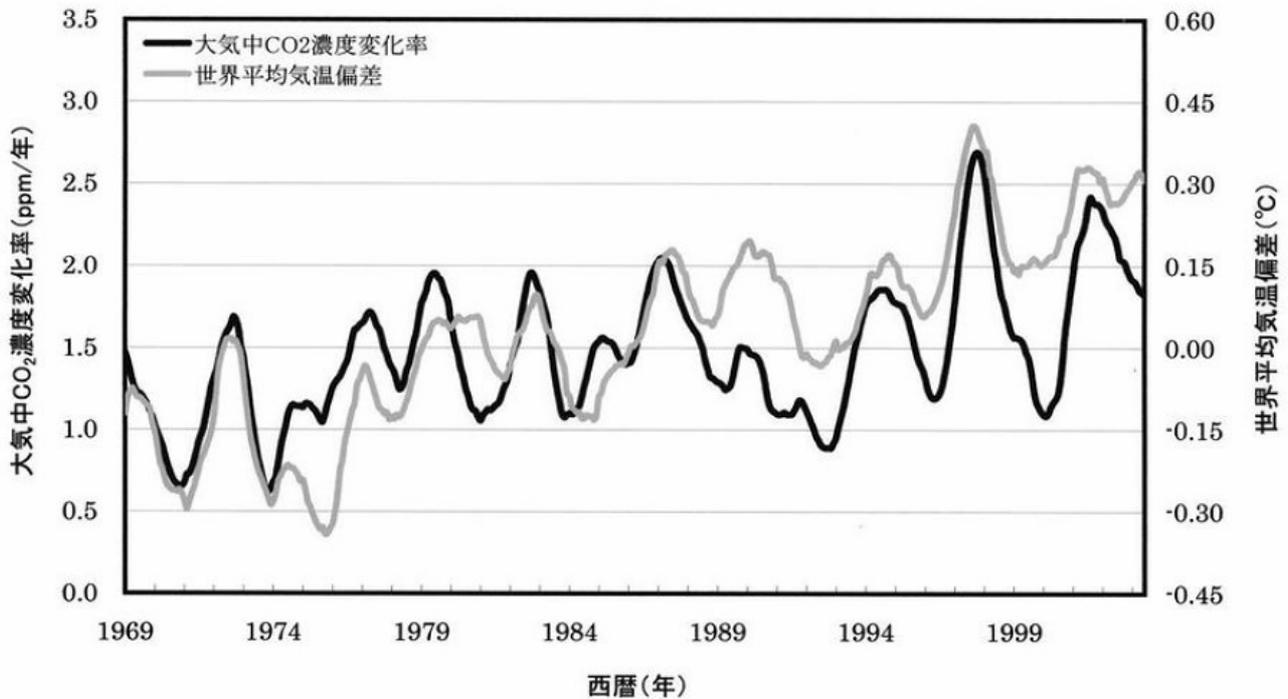


図 2-10 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度変化率と世界平均気温偏差の経年変化

図 2-10 から明らかなように、世界平均気温偏差と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率の極大・極小値は同期して表れていることが分かります。

以上の検討から、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度モデル  $F(t)$  は実際の気温観測値と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度観測値との関係を矛盾なく、合理的に説明できることが確認できました。

#### (5) 気温と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度時間変化率の散布図

これまでの検討で気温の変動が原因となって結果として大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が変動することが分かりました。具体的には、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間に対する変化率が気温の一次関数として近似できることが分かりました。

ここでは、前節で示した気温（世界平均気温偏差）と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率の経年変化を示したデータを基に、これを気温と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率の散布図として整理することで、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率を表す  $T(t)$  の関数の一次近似式の定数を求めることにします。

図 2-11 に示す散布図の回帰直線の式は  $x = T(t)$ 、 $y = \frac{dF(t)}{dt}$  なので次の通りです。

$$\frac{dF(t)}{dt} = C_1 \cdot T(t) + C_2 = 2.39T(t) + 1.47(\text{ppm/年})$$

散布図の回帰直線は、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率を表す  $T(t)$  の関数に対する一次近似

式であり、比例定数  $C_1$  は  $2.39$  ((ppm/年)/°C) だということが分かります。

これは、気温（世界平均気温偏差）が  $1^\circ\text{C}$  上昇すると大気中  $\text{CO}_2$  濃度の 1 年間あたりの上昇量が  $2.39\text{ppm}$  だけ大きくなることを示しています。

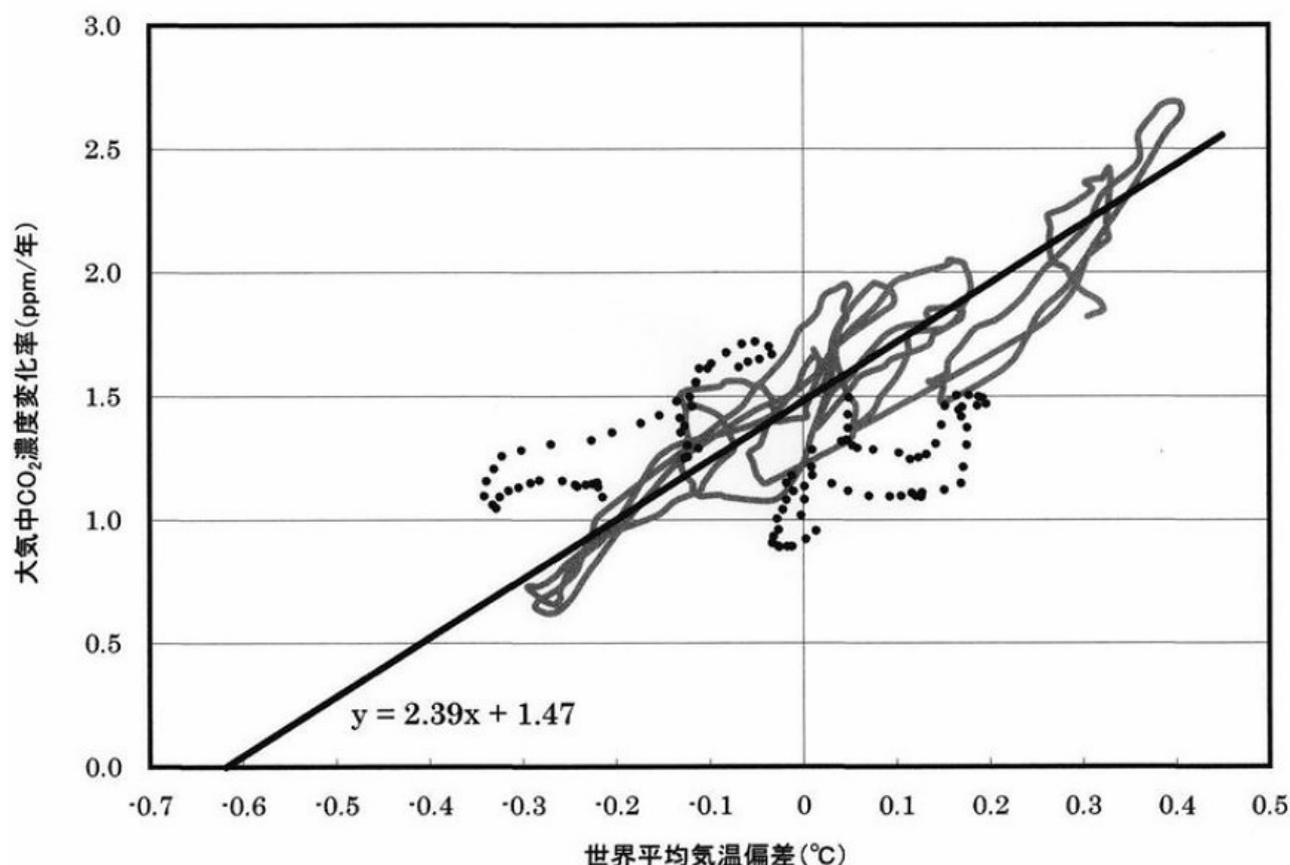


図 2-11 世界平均気温偏差と大気中  $\text{CO}_2$  濃度変化率の散布図

回帰直線の式に  $T(t)=0$  を代入すると  $\frac{dF(t)}{dt} = C_2 = 1.47$  (ppm/年) になります。

これは、世界平均気温偏差が  $0^\circ\text{C}$  の時（観測期間の平均気温の時）には大気中  $\text{CO}_2$  濃度が年率  $1.5\text{ppm}$  程度上昇すると述べたことに対応します。観測期間の長期的な大気中  $\text{CO}_2$  濃度の上昇傾向はより正確には年率  $1.47\text{ppm}$  の上昇ということになります。

$\frac{dF(t)}{dt} = 0$  に対応する世界平均気温偏差を求めると次の通りです。

$$T(t) = -\frac{1.47}{2.39} = -0.615(^\circ\text{C})$$

気温が観測期間の平均値よりも  $0.615^\circ\text{C}$  だけ低くなると大気中  $\text{CO}_2$  濃度の上昇率は  $0$  になります。

## (6) 大気中 $\text{CO}_2$ 濃度についての考察

以上、榎田一近藤による大気中  $\text{CO}_2$  濃度に対する分析の概要を紹介してきました。これを踏まえて、現在の氷河期、そして完新世の大気中  $\text{CO}_2$  濃度の変動機構について、改めて考察しておくことにします。

これまで見てきた大気中  $\text{CO}_2$  濃度の変動を表す関数  $F(t)$  を一般化することを考えます。ただしここで扱う数式は、説明を視覚化するためであり、厳密な数学の話をするわけではありませんので、あまり細かいことは気にしないでください。

大気中の  $\text{CO}_2$  濃度  $F(t)$  に対して影響を与える自然現象は無数に存在します。例えば環境の温度 $\equiv$ 気温  $T$ 、生態系の状態  $X_1$ 、火成活動の活性度  $X_2$ 、産業活動  $X_3$ 、 $\dots$ 。

大気中の  $\text{CO}_2$  濃度を表す関数  $F(t)$  は形式的に次のように書くことができます。

$$F(t) = F(T, X_1, X_2, X_3, \dots)$$

さらに、気温  $T$  やその他の自然現象の状態を表す値  $X_1, X_2, X_3, \dots$  は時間  $t$  の関数です。

$$T = T(t), X_1 = X_1(t), X_2 = X_2(t), X_3 = X_3(t), \dots$$

このように、大気中の  $\text{CO}_2$  濃度を表す関数  $F(t)$  はそれぞれが時間の関数である  $T(t)$  や  $X_1(t), X_2(t), X_3(t), \dots$  の関数になっています。

ここまで見てきた大気中の  $\text{CO}_2$  濃度についての自然科学的な検討内容を整理しておきます。

大気中の  $\text{CO}_2$  濃度は、気温や植物や動物の状態、火山活動の状態、工業生産活動の状態など、多くの要因の結果として変動しています。

300 万年ほど前に現在の氷河期に入りました。パンゲア超大陸の分裂初期のような激しい環境変化を伴う火成活動は収まり、無機的な自然環境、生態系の状態も比較的落ち着いた状況です。

100 万年ほど前から、地球の温度状態は地球の天体としての軌道要素の変動による太陽から供給される太陽放射の変動に伴って、約 10 万年の周期で変動しています（ミランコビッチ・サイクル）。

南極氷床のアイスコア分析から得られている最近 80 万年程の期間の大気中の  $\text{CO}_2$  濃度、 $\text{CH}_4$  濃度はいずれも気温に極めてよく同期して変動していることが分かっています。

これは、 $\text{CO}_2$  や  $\text{CH}_4$  の海水に対する溶解反応が発熱反応であり、気温が上昇すると結果として平衡状態が大気中濃度が上昇する方向に遷移するという化学的な知見を体現しています。

アイスコアの分析結果から気温変動と  $\text{CO}_2$  の変動曲線は相似形を示し、極めて良い対応を示すことが分かっています。これは、この氷河期において、大気中の  $\text{CO}_2$  濃度を変動させる主要な因子が気温変動であることを示しており、その他の自然環境に関わる因子の影響が相対的に小さい、あるいは大きく変化していないことを示しています。

これを数学的な表現を借りると形式的に次の様に見えるでしょう。

大気中の  $\text{CO}_2$  濃度に対して、温度  $T$  に比べて他の因子の影響が小さいという条件は次の様に表せるでしょう。

$$\frac{\partial F}{\partial T} \gg \frac{\partial F}{\partial X_1}, \frac{\partial F}{\partial X_2}, \frac{\partial F}{\partial X_3}, \dots$$

あるいは、温度以外の因子の時間に対する変化が小さいことは次の様に表せるでしょう。

$$\frac{dT}{dt} \gg \frac{dX_1}{dt}, \frac{dX_2}{dt}, \frac{dX_3}{dt}, \dots$$

これらの条件を考慮して大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を表す関数 F(t) の 時間 t に対する変化率を求めると次の通りです。

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} + \frac{\partial F}{\partial X_1} \cdot \frac{dX_1}{dt} + \frac{\partial F}{\partial X_2} \cdot \frac{dX_2}{dt} + \frac{\partial F}{\partial X_3} \cdot \frac{dX_3}{dt} + \dots$$

上式の右辺の第二項以下は二次の微小項（小さい数同士を掛け合わせた数）なので、第一項に比較して無視できるほど小さいと考えられます。したがって、簡単に次の様に簡略化できます。

$$\frac{dF}{dt} \doteq \frac{\partial F}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt}$$

つまり、ミランコビッチ・サイクルに現れている大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変動を表す場合、近似的に大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を表す関数 F は気温 T(t) だけの関数と考えてよいということです。槌田－近藤の分析では、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の時間に対する変化率は一次近似として温度 T の一次関数として表せるとして、

$$\frac{dF}{dt} = C \cdot (q_{in} - q_{out}) = C_1 \cdot T(t) + C_2$$

としました。

氷河期の大局的な気温変動に対しては、上式の近似で十分だと考えられます。

次に、近年の短期的な大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変動について考えます。炭素循環図の分析から、産業革命以後の大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変動についても 90%以上は気温を中心とした自然変動が原因であることが分かりました。

人為的な CO<sub>2</sub> 放出は主要な変動要因ではありません。観測されている大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変動から、人為的な影響を明確に示す兆候を見出すことは出来ません。

一方、槌田－近藤の分析における気温と大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の時間に対する変化率を示したグラフを見ると、極値の出現が同期しているにもかかわらず、両曲線間の乖離が大きい時期が散見されます。

例えば、1991 年以降の数年間の期間です。これは、この時期に大気中 CO<sub>2</sub> 濃度に対する気温以外の変動要因による比較的大きな影響があったことを示唆しています。

この時期は、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度だけではなく、地球の温度状態においても特異な時期でした。図 2-12 に大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変化率と海面水温の変動を示します。

1991 年以降、南太平洋ではエルニーニョ現象（図にピンクで示した期間、水色はラニーニャ現象期間）が起きていました。通常であればエルニーニョ現象が起こると地球環境は気温が上昇します。ところが 1991 年以降数年間、全世界的に海面水温、気温が低下傾向を示し

ました。

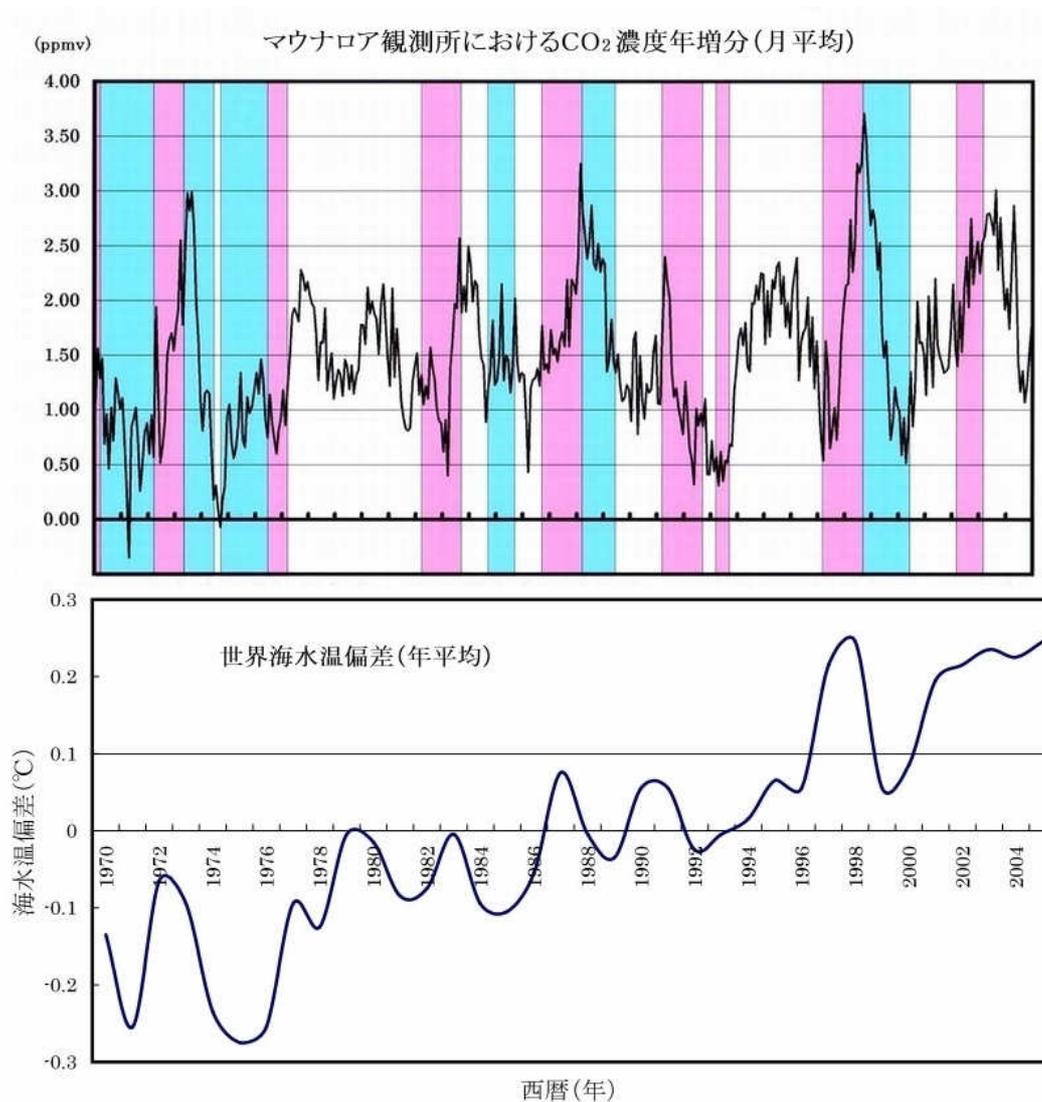


図2-12 大気中CO<sub>2</sub>濃度観測値と海面水温

この特異な現象に対して最も大きな影響を与えたのが1991年のフィリピンのピナツボ山の大噴火だと考えられます。この大噴火によって火山噴出物が大量に成層圏に運ばれた結果、大気中に長く留まることになりました。

当時、日本でも普段よりも鮮やかな真っ赤な夕焼けが見えたことを覚えています。これは火山噴出物によって比較的波長の長い赤色の電磁波が強く散乱された結果です。

火山噴出物の影響で地球大気の大気放射に対する透明度が低下し、あるいは反射率が大きくなったことで地表面を暖める有効太陽放射が減少したと考えられます。これが気温や海面水温の低下につながりました。

海面水温が低下すると海洋はより大量の大気中のCO<sub>2</sub>を吸収するために大気中のCO<sub>2</sub>濃度が低下します。

こうした特異な自然現象が輻射した影響で、両曲線間の乖離が大きくなったと考えられます。

気温  $T$  以外の何らかの要因の影響  $X$  を考慮する必要がある場合を考えることにします。ここでは説明を簡単にするために、気温以外の要素を一つの値  $X$  で考慮できるものとし、この場合、大気中  $\text{CO}_2$  濃度を表す関数  $F$  は次の通りです。

$$F = F(T, X)$$

$F$  の時間  $t$  に対する変化率は次の通りです。

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} + \frac{\partial F}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dt}$$

図 2-13 に示すように、 $T-X$  平面とそれに直交する方向に  $dF/dt$  の値を示す軸からなる座標系を考えます。

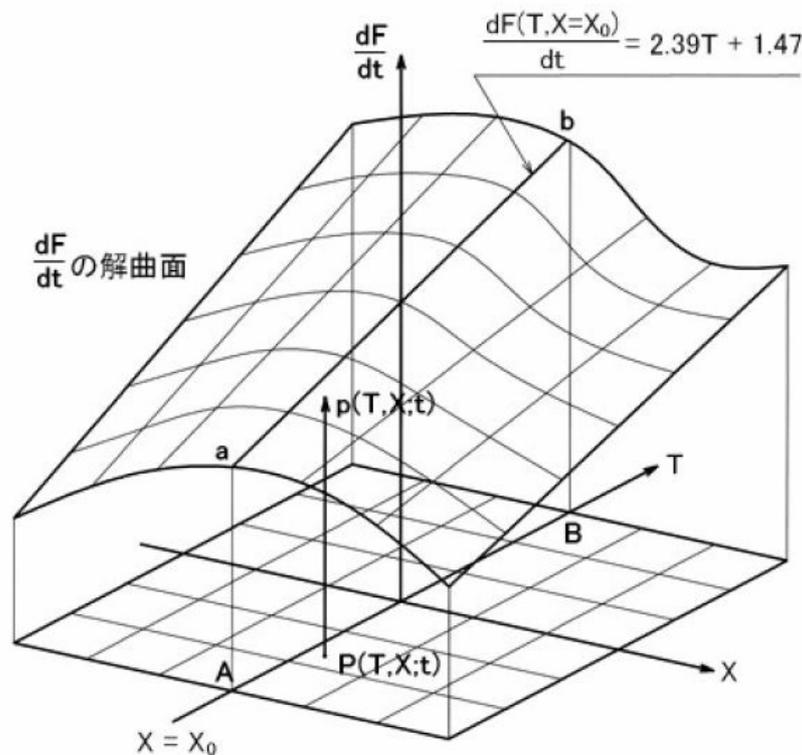


図 2-13  $dF/dt$  の解曲面と散布図

ある時刻  $t$  における平均気温偏差  $T$  とある変動要因  $X$  の値を示す  $T-X$  平面上の点を  $P(T, X; t)$  とします。その時の大気中  $\text{CO}_2$  濃度の時間変化率の値を表す点を  $p(T, X; t)$  とします。

$T-X$  平面上の任意の点  $P$  について対応する大気中  $\text{CO}_2$  濃度の時間変化率の値を表す点  $p(T, X; t)$  をプロットすると一つの曲面になります。これが図に示す  $dF/dt$  の解曲面です。

槌田-近藤の分析では、近年の大気中  $\text{CO}_2$  濃度の変動に対しても観測期間中の  $X$  の変動は小さいものとして、 $X=X_0$  定数と仮定しました。この場合、

$$\frac{dX}{dt} = \frac{dX_0}{dt} = 0$$

なので、アイスコア分析の場合と同じように、大気中 CO<sub>2</sub>濃度を表す関数  $F = F(T)$  を用いて  $dF/dt$  の第一次近似を求めました。

世界平均気温偏差を横軸、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の時間変化率を縦軸とした散布図の回帰直線は、図の  $dF/dt$  の解曲面と平面  $X=X_0$  との交線  $a-b$  に対応します。交線  $a-b$  の式は次の通りです。

$$\frac{dF(T, X = X_0)}{dt} = \frac{\partial F}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dt} = 2.39T(t) + 1.47$$

実際には、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の変動要因  $X$  は  $X_0$  の周辺で絶えず変動しています。したがって、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の時間変化率は一般に平面  $X=X_0$  上にはありません。

散布図上の点は実際の観測値  $p(T, X \neq X_0; t)$  の平面  $X=X_0$  上への正射影です。したがって散布図上の点は回帰直線の周辺に分布することになります。

1991年以後数年間は、地球の自然環境に大きな影響を与えたピナツボ火山の大爆発による突発的＝短期的な大気の透明度の低下ないし反射率の増大の影響  $X$  が無視できないほど大きかったと考えられます。突発的、短期的な大きな影響の場合、

$$\frac{dX}{dt} \geq \frac{dT}{dt}$$

なので、 $dF(T, X)/dt$  の式の右辺第二項  $(\partial F/\partial X)(dX/dt)$  を二次の微小量として無視することが出来ません。そのため、この時期の世界平均気温偏差の変動と大気中 CO<sub>2</sub>濃度の変動に大きな乖離が生じたと考えられます。

同様に、世界平均気温偏差の変動と大気中 CO<sub>2</sub>濃度の変動に大きな開きがある場合には、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の変動に対して大きな影響を及ぼす何らかの自然環境の変動があることを示唆していると考えられます。

産業革命以降の大気中 CO<sub>2</sub>濃度についてもその主要な変動要因は環境の温度  $T$  を中心とする自然変動です。

産業をはじめとする人間社会の活動から放出されている CO<sub>2</sub>が大気中 CO<sub>2</sub>濃度に影響を与えることは間違いありません。しかし、その割合は高々 3%、12ppm 程度です。人為的な影響を  $X$  とした場合、その大きさ、時間に対する変化率は小さいため

$$\frac{\partial F}{\partial T} \gg \frac{\partial F}{\partial X} \quad \text{and} \quad \frac{dT}{dt} \gg \frac{dX}{dt}$$

なので、大気中 CO<sub>2</sub>濃度の変化率に与える影響は無視できるほどに小さいのです。

#### 参考：人為的 CO<sub>2</sub>蓄積モデルについての考察

槌田－近藤の分析では、大気と地球の表面環境の間で CO<sub>2</sub>が絶えず循環しているというモ

デルで表現できることを前提として分析を行いました。

これに対して、標準的な人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説の基礎になっているのが、「人為的に放出した CO<sub>2</sub> の半分程度が継続的に大気に蓄積した結果、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度が上昇した」とする「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」です。

## 議論 18

### 人為的に排出された二酸化炭素の大気中滞留時間は短い。

#### 証拠 1

人間活動によって放出されたCO<sub>2</sub>のうち、大気中に長期的に残存する量は等比数列の和として計算され、3.33年分の放出量にあたる量しか残存しない(植田 2007; 植田2008)。

#### 反論

「人間活動によって放出されたCO<sub>2</sub>のうち、約3割が海洋や森林に吸収される」(5割と言った方が実態には近いが、植田氏の議論に合わせて3割という値を使う)という表現がよくなされる。これは丁寧に言い換えれば、「森林や海洋はCO<sub>2</sub>を放出したり吸収したりしているが、地球全体では現在正味で吸収となっている。その1年間の吸収量は、同じ年に人間活動によって放出されるCO<sub>2</sub>量の約3割にあたる」という意味である(人

間活動によって放出されたCO<sub>2</sub>分子が選択的に吸収されるという主張は含まれていないことに注意)。すなわち、植田氏が主張しているような「ある年に人間活動によって放出されたCO<sub>2</sub>は、その年のうちに3割が吸収され、次の年には残りの7割のうちの3割がさらに吸収されるという過程が無限に繰り返される」という意味ではない。

したがって、人間活動によって放出されるCO<sub>2</sub>量をQ、森林や海洋による吸収量のQに対する割合をrとし、Qとrは時間変化しないと仮定すれば、大気中に残存するCO<sub>2</sub>量の正しい計算法は、

$$Q \times (1-r) + Q \times (1-r) + Q \times (1-r) + \dots$$

ということになる。この数列の和は収束せず、人間活動によるCO<sub>2</sub>放出が続く限り大気中のCO<sub>2</sub>量は増えていくことになる。

ここでは、東京大学 IR3S/TIGS 叢書 No.1「地球温暖化懐疑論批判 議論 18」から植田敦の離散的表現の CO<sub>2</sub> 循環モデルに対して、標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」の主張を紹介します。

非常にわかりにくい説明なので、彼らの主張する「大気中に存在する CO<sub>2</sub> 量の正しい計算法」が成立する可能な解釈を補足したいと思います。

まず、植田の離散モデルに対する解釈について触れておきます。

植田の離散モデルについては既に紹介した物理学会誌 Vol. 62, No. 2, 2007 に掲載された植田敦のレポート「CO<sub>2</sub>を削減すれば温暖化は防げるのか」

<https://www.env01.net/.../glob.../contents/s002/tutida01.pdf>

を確認してください。

地球温暖化懐疑論批判議論 18 での彼らの主張では、「前略(5割と言った方が実態には近いが、植田氏の議論に合わせて3割という値を使う)」と述べています。これは正しくありません。

まず議論の元となるモデルが違うことを確認しておくことが必要です。

槌田の離散モデルでは、大気中に存在する CO<sub>2</sub> の全量を約 730Gt として、毎年陸域と海域でそれぞれ約 120Gt、90Gt、合計で約 210Gt が交換されていることから「一年間では大気中に存在する CO<sub>2</sub> 量 730Gt の内、210Gt、割合にすると 210/730≒0.287、約 3 割が吸収されている」という主張です。

槌田の離散モデルによる大気中 CO<sub>2</sub> 量は、地表面環境からの年間 CO<sub>2</sub> 放出量を  $q$ 、地表面環境の吸収率を  $r$  としたとき、経過年数を  $\infty$  とした場合の年度末の大気中の残存量は等比級数の公式から次のように計算できます。

$$q \cdot (1-r) + q \cdot (1-r)^2 + q \cdot (1-r)^3 + \dots = q \cdot \frac{1-r}{1-(1-r)} \doteq q \times 2.33$$

CO<sub>2</sub> の発生源を自然起源の  $q_1$  と人為起源の  $q_2$  として明示的に表示すると残存量は次の通りです。

$$q \times 2.33 = (q_1 + q_2) \times 2.33 = 2.33q_1 + 2.33q_2$$

槌田は上式の右辺第二項を指して、「一年間の人為的 CO<sub>2</sub> 放出量の高々 2.33 年分しか大気中に留まることはない」と主張しています。次年度の期首に  $q_2$  が加わるとすると、最大では 3.33 年分が大気中に存在することになります。

槌田の主張は、大気中に存在する CO<sub>2</sub> を放出源や放出時期によって区別することは出来ないで、着目した時点で大気中に存在する全ての CO<sub>2</sub> に対して同一の割合で地表面環境が吸収しているとしています。

「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」は、大気中に放出される自然起源の CO<sub>2</sub> 放出  $q_1$  は一年間で完全に地表面環境に吸収されるとします。これは、10 割の吸収です。

人為的な CO<sub>2</sub> 放出  $q_2$  については、放出した年にその 5 割程度が吸収され、残りの 5 割が毎年大気中に蓄積されるという主張です。

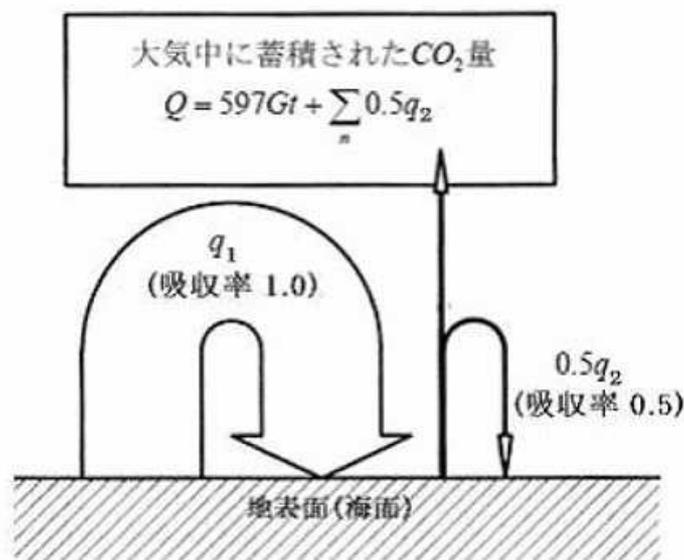


図 2-14 人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル

このように、「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」では、次の様に同時に 3 種類の吸収率の存在が仮

定されています。

- ①着目年以前に大気中に存在していた CO<sub>2</sub> に対する吸収率=0 割
- ②着目年に放出された自然起源の CO<sub>2</sub> に対する吸収率=10 割
- ③着目年に放出された人為起源の CO<sub>2</sub> に対する吸収率=5 割

したがって、モデルが異なるので、槌田の言う吸収と「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」の吸収の割合が異なるのは当然あり、「前略（5 割と言った方が実態には近いが、槌田氏の議論に合わせて 3 割という値を使う）」というのは頓珍漢な評価です。

槌田の離散モデルと比較して、同じ空間に存在する CO<sub>2</sub> に対して、その起源や放出時期によって地表面環境の吸収率が異なるというのが「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」の本質的な違いです。

「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」では、着目年よりも前に大気中に存在していた CO<sub>2</sub> は地表面環境から吸収されることはなく不変であり、自然起源の CO<sub>2</sub> は単一年度中に 100% が吸収されるため大気中の CO<sub>2</sub> 量の変化には関与しないとします。

したがって、大気中の CO<sub>2</sub> 量の変化に関与するのは地表面環境に吸収されなかった人為的な CO<sub>2</sub> 放出の 5 割だという主張です。

議論 18 において彼らはわざわざ「人間活動によって放出された CO<sub>2</sub> 分子が選択的に吸収されるという主張は含まれていない」と書いています。

しかし、槌田の疑問は人為的に放出した CO<sub>2</sub> だけが大気中に留まり続けることはないであろうというものです。彼らのモデルは、正に「人為的に放出した CO<sub>2</sub> だけ」が選択的に大気中に蓄積することを主張しているのです。

彼らの結論は次式に集約されています。次式は人為的な CO<sub>2</sub> 放出が開始されて以降の n 年間の大気中の CO<sub>2</sub> の変化量です。

$$Q \cdot (1-r) + Q \cdot (1-r) + Q \cdot (1-r) + \dots = n \times Q \cdot (1-r)$$

ここに、Q：年間人為的 CO<sub>2</sub> 放出量、r：人為的 CO<sub>2</sub> の吸収率、n：経過年数

したがって、この関数は議論 18 の主張通り、「人間活動による CO<sub>2</sub> 放出が続く限り大気中の CO<sub>2</sub> 量は増えていくことになる。」ので、次の様に表すことができます。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \{n \times Q \cdot (1-r)\} = \infty$$

槌田-近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデルは単純な構造です。地表面環境から放出された CO<sub>2</sub> である q<sub>in</sub> は放出された瞬間に元々大気中に存在した CO<sub>2</sub> と混合し、同化します。地表面環境は大気中に存在する CO<sub>2</sub> である Q から吸収率 r で吸収します。

これに対して、標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」では、地表面環境から放出された自然起源の CO<sub>2</sub> である q<sub>1</sub> は、もともと大気中に存在した CO<sub>2</sub> とは混合することなく、再び地表面環境に完全に吸収されます（吸収率 1.0）。

人為起源の CO<sub>2</sub> である q<sub>2</sub> は半分が地表面環境に吸収され（吸収率 0.5）、残りの半分が

大気中に「蓄積」します。

このように標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」は複雑だけでなく、極めて不自然な構造を持っています。

これは、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説の正当性を主張するためには、産業革命以降の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇の原因が「人為的に放出した CO<sub>2</sub> の半量程度が蓄積した結果」であることを主張することが至上命題だったからだと推測します。まず結論が先にあり、それを正当化するための可能なモデルとして考えられたのが「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」なのでしょう。

「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」を棄却するためにはこれに反する自然現象を一つでも示すことが出来れば十分です。以下、私の思いつく問題点を挙げることにします。

① 人為的 CO<sub>2</sub> 放出量  $q_2$  は 6(Gt-C/年) 程度、自然起源の放出量  $q_1$  は 210(Gt-C/年) 程度なのに、「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」では、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の変動全てを放出量のわずか 3% の人為的に放出された CO<sub>2</sub> だけの関数としていることは不合理。

② 大気中に放出された CO<sub>2</sub> は放出された瞬間に元々大気中に存在した CO<sub>2</sub> と混合し同化する。これは気体の拡散やエントロピー増大の法則を持ち出すまでもなく、だれもが納得できる事実です。更に、派生的には、放出源や放出時期の異なる CO<sub>2</sub> を区別することも不可能です。

したがって、「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」が主張するように放出時期や放出源毎に異なる吸収率を設定することは不合理であり、自然現象としては起こりえない現象です。なぜこのような無謀なモデルが考えられたのでしょうか？

もしも、放出源や放出時期に関わらず、CO<sub>2</sub> が混合していることを認めると、人為的に放出した CO<sub>2</sub> だけが蓄積することを主張することが不可能になります。

また議論 18 で彼らが主張した『榎田氏が主張しているような「ある年に人間活動によって放出された CO<sub>2</sub> は、その年のうちに 3 割が吸収され、次の年には残りの 7 割のうちの 3 割がさらに吸収されるという過程が無限に繰り返される」という意味ではない。』という主張の根拠が消滅します。彼らの「人間活動による CO<sub>2</sub> 放出が続く限り大気中の CO<sub>2</sub> 量は増えていくことになる」という主張も根拠を失います。

③ 南極アイスコア分析に見られるように、人為的な CO<sub>2</sub> の放出が無くても大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は気温変動という自然現象に伴って大きく変動しているが、「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」はこの事実と矛盾しています。

大気中の CO<sub>2</sub> の微小時間  $\Delta t$  の間の変化量を  $\Delta Q$ 、地表面環境からの CO<sub>2</sub> 放出速度を  $q_{in}$ 、吸収速度を  $q_{out}$  と書くと、榎田-近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデル、標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」のどちらとも、次のように書くことができます。

$$\Delta Q = (q_{in} - q_{out}) \cdot \Delta t$$

榎田-近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデルでは、地表面環境の CO<sub>2</sub> 吸収速度  $q_{out}$  は大気中の CO<sub>2</sub> 量  $Q$  に比例し、その比例定数 (=吸収率)  $r$  とします。

$$\Delta Q = (q_{in} - r \cdot Q) \cdot \Delta t$$

樋田－近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデルでは、大気中の CO<sub>2</sub> の変化量  $\Delta Q$  を表すために、地表面環境からの放出量  $q_{in}$ 、大気中の CO<sub>2</sub> 量  $Q$ 、地表面環境の吸収率  $r$  という関連するすべての要素を含んで定式化しています。

これに対して標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」では、大気中の CO<sub>2</sub> の変化量  $\Delta Q$  を表すために人為的な CO<sub>2</sub> 放出速度  $q_2$  だけを使用します。

$$\Delta Q = 0.5 \cdot q_2 \cdot \Delta t$$

最後に、樋田－近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデルと標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」について、IPCC2007 年報告の炭素循環図を基に簡単なシミュレーションを行うことにします。

初期状態として大気中 CO<sub>2</sub> 量  $Q_0=597\text{Gt}$ 、地表面環境からの年間 CO<sub>2</sub> 放出量  $q_{in}=190.2\text{Gt/年}$ 、地表面環境の年間 CO<sub>2</sub> 吸収率は、

$$r = \frac{q_{in}}{Q_0} = \frac{190.2}{597} = 0.3186 \quad (1/\text{年})$$

この状態に対して、人間活動による CO<sub>2</sub> 放出量の増加  $\Delta q_{in} = 6.4\text{Gt/年}$  をステップ関数的に与えた場合の大気中 CO<sub>2</sub> 量  $Q$  の変化を 15 年間追跡します。その後、人為的 CO<sub>2</sub> 放出を 0 Gt/年 に戻してもう 15 年間の変化を追跡します。

樋田－近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデルは連続量に対する次の式を使用します。

$$Q(t) = \frac{q_{in}}{r} + \left( Q_0 - \frac{q_{in}}{r} \right) \cdot e^{-rt}$$

標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」は次式を使います。

$$Q(t) = Q_0 + 0.5 \cdot q_2 \cdot t$$

シミュレーション結果を図 2-15 に示します。

初めの 15 年間について、いずれのモデルも大気中の CO<sub>2</sub> 量は増加します。しかし両者には大きな違いがあります。

標準的な「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積モデル」は単調に増加し続けます。もし経過時間を  $\infty$  にすると大気中の CO<sub>2</sub> 量は  $\infty$  に発散します。

一方、樋田－近藤の CO<sub>2</sub> 循環モデルは急速にある一定値に収束します。経過時間を  $\infty$  にした時の大気中の CO<sub>2</sub> 量は 617.1Gt ですが、15 年経過した段階で既に 616.9Gt、割合にして  $616.9/617.1=0.9997$  まで収束しています。

生態系を含む地球というシステムは、比較的安定しており、多少の擾乱を与えても急速にそれを緩和して新たな安定状態を取り戻すと考えられます。地表面環境からの CO<sub>2</sub> 放出速度が僅か 3% 程度変化するだけで、大気中の CO<sub>2</sub> 量が発散するようなモデルは非現実的です。

次に、15年経過した後、人為的CO<sub>2</sub>放出を0Gt/年に戻した後の変化は対照的です。  
標準的な「人為的CO<sub>2</sub>蓄積モデル」の大気中のCO<sub>2</sub>の変化量は、

$$\Delta Q = 0.5 \cdot q_2 \cdot \Delta t = 0.5 \cdot 0 \cdot \Delta t = 0$$

なので、人為的なCO<sub>2</sub>放出が停止すると、大気中のCO<sub>2</sub>量は変化しなくなります。

一方、槌田-近藤のCO<sub>2</sub>循環モデルでは大気中のCO<sub>2</sub>量は減少し、15年経過すると人為的なCO<sub>2</sub>放出がない場合と同じ状態に復元します。

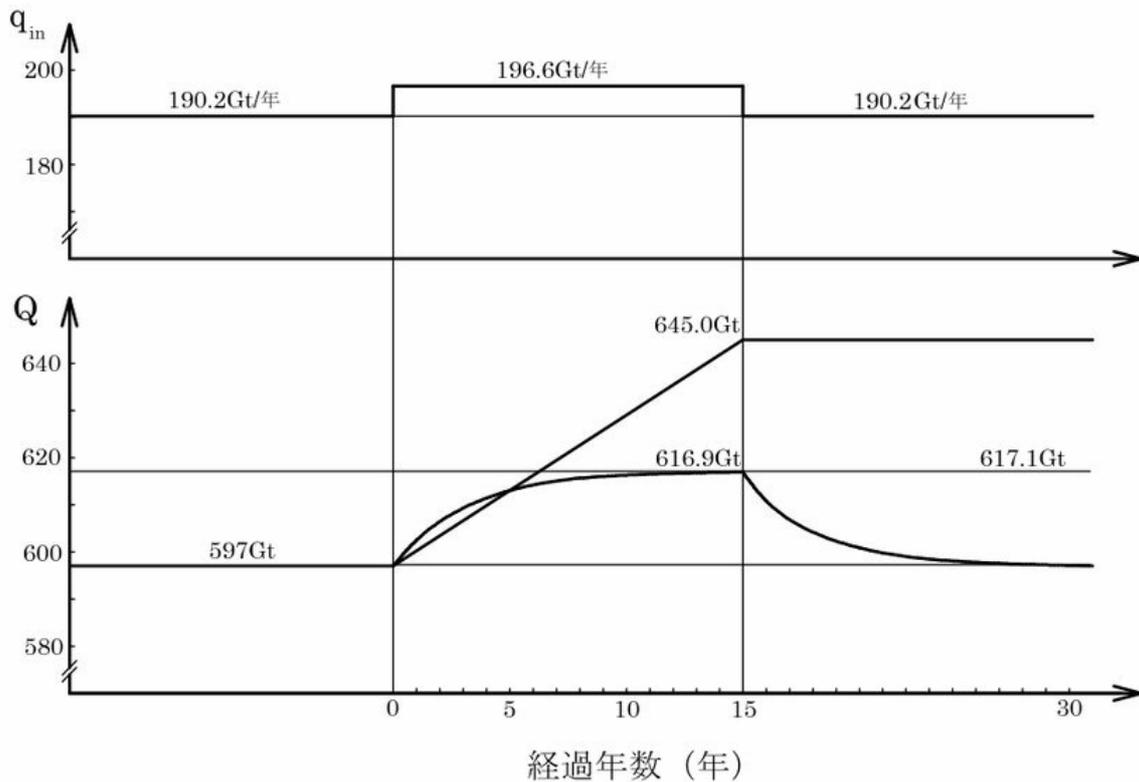


図2-15 大気中CO<sub>2</sub>量に対する循環モデルと蓄積モデル

皆さんは、槌田-近藤のCO<sub>2</sub>循環モデルと標準的な「人為的CO<sub>2</sub>蓄積モデル」のいずれが現象をよりよく表しているとお考えでしょうか？

### (7) 結論—人為的CO<sub>2</sub>地球温暖化は存在しない

2章1節でみたように、IPCC2007年報告に示されている地表面環境の炭素循環構造から、次のことが結論できます。

- ① 産業革命以降の大気中CO<sub>2</sub>濃度上昇の主因は主に海洋からのCO<sub>2</sub>放出の増加である。
- ② 海洋からのCO<sub>2</sub>放出の増加による大気中CO<sub>2</sub>濃度の上昇の原因は、CO<sub>2</sub>の海水への溶解反応が発熱反応であり、環境温度≒気温の上昇を緩和するために、吸熱反応である海洋からのCO<sub>2</sub>放出反応が進む方向に平衡状態が遷移した結果である。

さらに本節における槌田-近藤の分析によって、C.D.Keelingによる1960年代からの大

気中 CO<sub>2</sub> 濃度の精密連続観測結果についても、気温の変動が原因となって、結果として大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇することが矛盾なく説明できることが確認されました。槌田-近藤の分析の結論は以下の通りです。

- ① 観測データから、気温変動に対して少し遅れて大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変動が起きていることから、気温変動が原因となって結果として大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が増加していることが確認された。
- ② 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度上昇の主因である海洋からの CO<sub>2</sub> 放出反応において、海洋からの CO<sub>2</sub> 放出速度は環境温度≒気温上昇と同期して変動する。
- ③ 大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の変化は海洋の CO<sub>2</sub> 放出・吸収速度の差を時間で積分することで求めるので、CO<sub>2</sub> 放出・吸収速度の差の経年変化に対して、1/4 周期だけ位相が遅れる。

以上の結果から、産業革命以後の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は、主に海洋における炭素循環が活発化したことが原因だということが確認できました。人為的な CO<sub>2</sub> 放出の増加による大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇量は高々12ppm にすぎません。

仮に、CO<sub>2</sub> 地球温暖化説が自然科学的に正しいとしても、産業革命以後の気温上昇の主因は海洋における炭素循環の活発化という自然現象です。付言すれば、海洋からの CO<sub>2</sub> の放出は吸熱反応なので、むしろ気温を低下させる要因になります。

さらに、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇をもたらす海洋における炭素循環の活発化の原因は環境温度≒気温の上昇です。「CO<sub>2</sub> 地球温暖化説」は気温上昇という原因と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の上昇という現象の原因と結果を取り違えており、誤りです。

「人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説」が成立するための二つの必要条件である「人為的 CO<sub>2</sub> 蓄積説」、「CO<sub>2</sub> 地球温暖化説」という二つの仮説はいずれも自然科学的に間違いであり、したがって「人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説」は成立せず、棄却されます。

当然の帰結として、温暖化防止のための人間社会の脱炭素化は自然科学的に無意味です。

## 2-3 気温と温室効果

以上の検討から、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化という仮説は、極めて粗雑な形而上学的な空論であることが分かりました。本来ならばこれ以上の自然科学的な検証は必要ありません。

しかし愚かな人間社会は、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化が事実であることを前提として、虚像の温暖化の脅威に対する対策として脱炭素社会の構築に莫大な資本を投下しようとしています。これは、不必要な工業生産規模の拡大による環境破壊が進行することを意味しています。

本節では、氷河期にある現在の気温がどのように決まるのか、温室効果とは何かについて示し、CO<sub>2</sub> 濃度上昇による環境破壊をもたらすような顕著な気温上昇が起こる可能性について検証することにします。

### (1) 氷河期の地球温度状態

1章でみたように、地球は 46 億年ほど前に出来て以降、当初保有していた熱エネルギーを一貫して宇宙空間に放出して冷却し続けています。その意味で、地球の熱環境は非定常的に変化し続けています。

しかし、地球の内部的な階層構造の変動によって、放熱速度は一定ではありません。ウィルソン・サイクルの局面によって放熱速度は大きく変動します。

現在は直近の超大陸パンゲアの分裂開始当初の激しい火成活動による活発な熱放出が終わり、次の超大陸の形成に向かって次第に内部熱の放出が小さくなり、300 万年ほど前に氷河期に入りました。現在の内部熱の放出は極小状態にあると考えられます。

その結果、地球の表面環境に供給される内部熱は太陽放射によって供給されているエネルギー量に比較して無視できるほどに小さいと考えられます。

したがって氷河期の地表面環境の温度状態≒気温は、近似的に、太陽から供給される有効放射エネルギーと平衡状態にあるとして考えることが出来ます。

地球の大気圏外において太陽光に垂直な面に到達する太陽放射のエネルギー密度は、約 1366 (W/m<sup>2</sup>) です。これを太陽定数と呼んでいます。

地球の半径を  $r$  としたとき、地球が太陽から受け取る放射エネルギーは  $1366 \cdot \pi r^2$  (W) です。これを地球の表面が均等に受け取るとした場合の平均的なエネルギーは次の通りです。

$$\frac{1366 \cdot \pi \cdot r^2}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = 341.5 \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

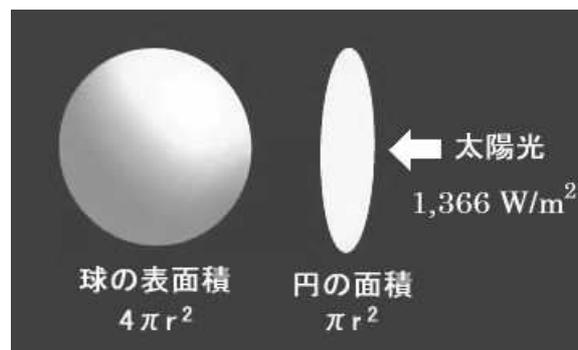


図 2-16 地表面が受け取る平均的な太陽放射

## (2) 黒体放射と熱放射

物体は表面から、その温度に応じた電磁波を放射しています。

黒体とは、すべての波長の電磁波を完全に吸収し、また完全に放射することのできる仮想の物体です。黒体から放射される電磁波は、温度によって波長分布や強さが一意的に決まります。

放射平衡（電磁波の吸収エネルギー量と放射エネルギー量が釣り合っている）にある黒体の表面温度を放射平衡温度と言います。放射強度と平衡温度の関係はステファン・ボルツマンの式によって計算することができます。

$$I = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

ここに、

$$\text{ステファンボルツマン定数} \quad : \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

$$\text{黒体の表面温度(K)} \quad : T$$

実在する物体は電磁波を完全に吸収・放出することは出来ません。黒体放射を 1.0 として、実在する物体の放射強度を射出率  $\varepsilon$  を使って次の様に表すことができます。

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (0 < \varepsilon < 1.0)$$

このように、熱平衡状態にある物体からその温度状態によって起こる放射現象を「熱放射」と呼びます。

例えば、非接触で物体の表面温度を測定する「放射温度計」はステファン・ボルツマンの式（法則）を用いて温度を測定する装置です。

ここで問題になるのが射出率  $\varepsilon$  が物質やその表面性状によって異なることです。測定する対象によって適切な射出率を設定しなければ正しい温度測定は出来ません。放射温度計の使用には適切なキャリブレーションが不可欠です。

黒体放射は温度によってエネルギー密度の波長に対する分布＝スペクトルが決まります。遠く離れた恒星から放射されている光のスペクトルを観測することで表面温度を測定することができます。

地球大気に温室効果がなければ、その表面温度は $-18^\circ\text{C}$ 程度になるという話をよく聞きます。これは、次頁の図 2-17 に示すように、地表面に到達する太陽の有効放射に対して地球が放射平衡にあるものとして放射平衡温度を計算しているのです。有効放射は太陽放射の 70%程度と仮定すると地表面の受け取る平均的な放射強度は次の通りです。

$$341.5 \times 0.7 = 239.05 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

ステファン・ボルツマンの式から、 $\varepsilon \doteq 1.0$  として地球の表面温度の近似値を求めると次の通りです。

$$T = \sqrt[4]{\frac{I}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{239.05}{5.67 \times 10^{-8}}} = 254.8 \text{ (K)} = -18.2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

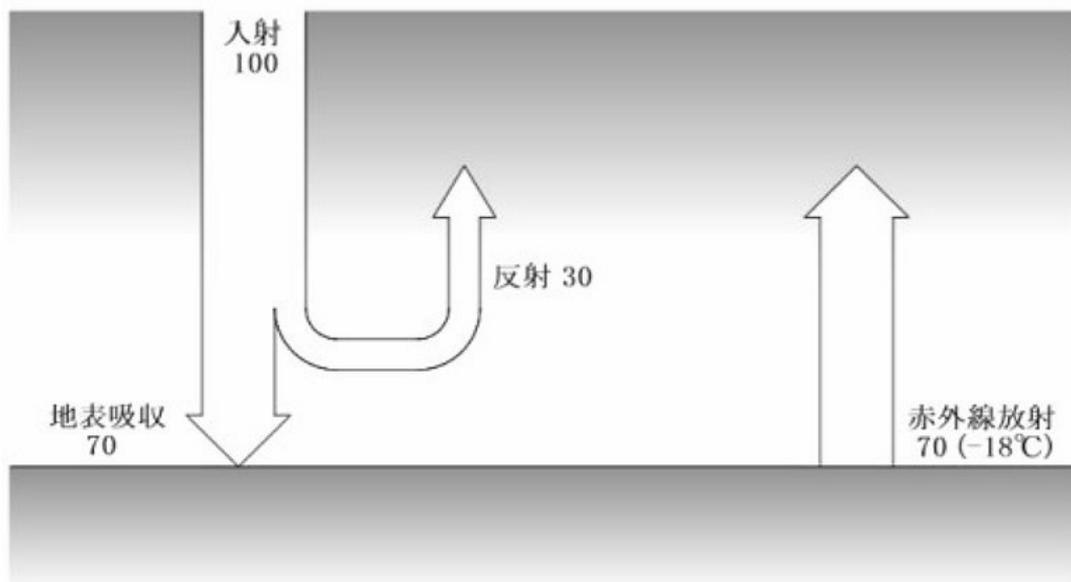


図 2-17 地球大気に温室効果のない場合の熱収支

### (3) 温室効果の発現機構の概要

地球には大気があります。対流圏の乾燥大気の組成は窒素  $N_2$  が 78%、酸素  $O_2$  が 21%、アルゴン  $Ar$  が 0.9%、二酸化炭素  $CO_2$  が 0.04% 程度です。

実際にはこの他に水蒸気  $H_2O$  が含まれていますが、 $H_2O$  濃度は大きく変動するため一般的に大気組成には含まれていません。

しかし、地球の温室効果を考えるとき、 $H_2O$  濃度は非常に大きな意味を持つので、少し検討しておくことにします。

地球の平均気温を  $15^\circ C$ 、平均湿度を 40% とした場合の大気中濃度を考えてみることにします。温度  $T(^{\circ}C)$  の時の飽和水蒸気量 (1 気圧  $1m^3$  の空気を含みうる水蒸気量 :  $g/m^3$ ) の近似値  $a(T)$  は次式で計算することができます。

$$a(T) = \frac{217 \cdot e(T)}{T + 273.15} \text{ (g/m}^3\text{)}$$

$$e(T) = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T}{T+237.3}} \text{ (hPa)} \quad : \text{ 飽和水蒸気圧}$$

$T = 15^\circ C$  の場合、

$$e(15) = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5 \times 15}{15+237.3}} = 17.05 \text{ (hPa)}$$

$$\therefore a(15) = \frac{217 \times 17.05}{15 + 273.15} = 12.8 \text{ (g/m}^3\text{)}$$

湿度 40% では  $12.8 \times 0.4 = 5.12 \text{ (g/m}^3\text{)}$  です。 $H_2O$  の分子量は  $18 \text{ (g/mol)}$  なので、

$$\frac{5.12}{18} \text{ mol} \times 22.4 \text{ l/mol} = 6.372 \text{ l} = 6372 \text{ ml} = 6372 \text{ ppm}$$

程度です。 $H_2O$  の大気中濃度は気温や環境条件によって大きく変動します。砂漠気候や寒冷地では  $H_2O$  の大気中濃度は極度に低下します。また、対流圏上端でも大きく低下します。

温室効果に決定的に重要な  $\text{H}_2\text{O}$  の挙動が、相変化を含めて、極めて複雑であることが気象現象の複雑さの大きな要因の一つです。

地球大気の中での温度の伝わり方を復習しておきます。

比較的気体分子密度が高い状態にあり、着目する微小空間にエネルギーや物質の出入りがなく、気体分子の速度分布が **Maxwell-Boltzmann** 分布に従うような状態を局所熱力学平衡状態と呼びます。気体の温度とは、局所熱力学平衡状態にある気体分子の平均的な並進運動エネルギーの大きさの指標であり、平均分子速度の 2 乗に比例します。

気体分子の運動は並進運動、回転運動、振動運動の三種類があります。

並進運動は分子が空間中を移動する運動です。回転運動は分子の内部構造の空間的な変化を伴わない剛体的な回転運動です。振動運動は分子内の原子相互の空間的な変動を持つ運動です。

局所熱力学平衡状態の下では、この三つの運動が等価なものとして分子衝突を介して分子間で絶えずエネルギーが交換されており、その結果、三つの運動にエネルギーが等しく分配されています（エネルギー等分配則）。

地球大気中の温度の伝わり方は伝導、放射、対流の三つの形態があります。

伝導は文字通り気体分子同士の衝突によって並進運動・回転運動のエネルギーの受け渡しが起こります。

放射は全ての気体分子が行うわけではありません。地球大気を構成する 3 原子以上の分子は、電気的性質が加速度的に変化する特定の運動モードで赤外線を放出します。このような性質を持つ気体分子の特徴を赤外活性と呼びます。

地球大気の中で主要な赤外活性気体分子は  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CO}_2$  です。地球大気の 99% 以上を占める  $\text{N}_2$  と  $\text{O}_2$  は赤外活性を持っていないことに注意してください。

$\text{H}_2\text{O}$  は大気中濃度が高く、広い波長帯域で赤外線を吸収する主要な赤外活性気体です。詳細は後に触れることにします。

赤外活性気体はその温度状態に応じて分子の種類ごとの特定の波長帯域で赤外線を放出（熱放射）あるいは吸収します。この赤外線の放射・吸収によってエネルギーを受け渡しています。

そして三つ目が対流です。これは気体分子の巨大な集合である空気塊が移動することによってその空気塊に含まれている気体分子の持つエネルギーが移動することを指します。

この三つの温度あるいはエネルギーの伝わり方の内、伝導と対流は気体が存在する空間だけで成り立ちます。放射だけは、気体の存在しない空間中でもエネルギーを伝達することが出来ます。

地球の表面環境は、地球内部の熱と太陽放射から供給されるエネルギーで絶えず暖められています。地球の温度状態が「準定常的」であることから、同量のエネルギーを宇宙空間に放出していることとなります。地球の外側はほとんど真空の宇宙空間が広がっています。したがって、地球からの放熱は、伝導や対流ではなく、赤外線放射によって行われています。

地球の大気に温室効果がない場合（＝地球大気に赤外活性がない場合）、太陽からの有効放射  $I_{sol}$  と地球表面からの放射  $I_e$  が平衡します（ $I_{sol} = I_e$ ）。この場合、地球の表面温度  $T_0$  は  $I_e$  に対する放射平衡温度になります（図 2-18 左）。

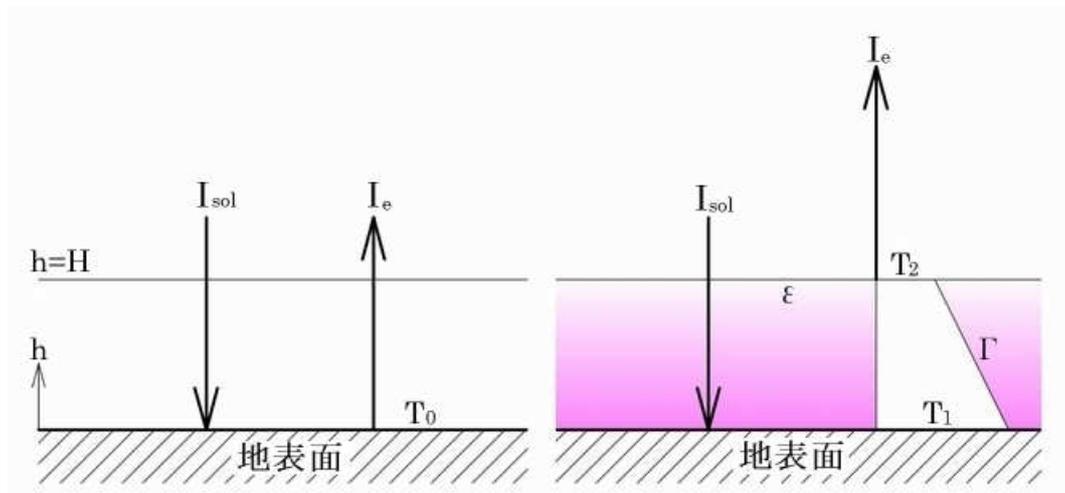


図 2-18 温室効果の発現機構

地球大気に温室効果がある場合について考えます。ただしここでは、話を単純にするため、地表の放射冷却現象は起こらないものとして、宇宙空間への放射は対流圏大気の赤外活性気体からの熱放射で賄われるものとします。

対流圏大気の射出率を  $\varepsilon$ 、大気温度を  $T_2$  とすると次の関係が成り立ちます。

$$I_{sol} = I_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_2^4$$

地表面に到達する有効太陽放射  $I_{sol} = 239.05 \text{ W/m}^2$ 、 $\varepsilon = 0.9$  とすると、対流圏大気上層の放射平衡温度は、

$$T_2 = \sqrt[4]{\frac{239.05}{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8}}} = 261.6 \text{ (K)}$$

この時の地表面の温度を  $T_1 = 15^\circ\text{C} = 288\text{K}$ 、対流圏の湿潤温度減率を  $\Gamma = -6.5 \text{ (K/km)}$  とすると次式が成り立ちます。

$$T_2 = T_1 + \Gamma \cdot H \quad \therefore H = \frac{288 - 261.6}{6.5} = 4.06 \text{ (km)}$$

以上をまとめると、地球は大気に赤外活性があることによって、対流圏の高度 4.06km 付近の  $261.6\text{K} = -11.4^\circ\text{C}$  の大気からの赤外線放射によって放熱していることになります。

高度 4.06km より下の大気温度は、断熱圧縮によって、湿潤温度減率に従って上昇するために地表面に接する大気温度＝地表面温度は  $15^\circ\text{C}$  に上昇します。

つまり、地球大気に赤外活性＝赤外線を放出する能力があることによって、地球放射を地表面に代わって対流圏の大気が担うことで地表面の温度が上昇するのです。これが温室効果の具体的な内容です。

実際には、乾燥地域や寒冷な地域では主要な赤外活性気体である水蒸気  $\text{H}_2\text{O}$  密度が小さいために、地表面放射の多くが大気に捕らえられずに宇宙空間に放射されています（放射冷

却現象)。地表面からの放射が多いほど大気からの放熱量は小さくて済みます。大気からの赤外線放射が小さくて済む分、大気の温度は低くなり、地表面の温度も低くなります。

少し思考実験を行うことにします。大気の厚さが厚くなるとどうなるでしょうか？

大気を構成する赤外活性気体からの放射は、あらゆる方向に等方的に放射されます。上方の大気の厚さがある程度厚い場所では上方に放射された赤外線は周囲の赤外活性気体に完全に吸収されてしまうため、宇宙空間には放射されません。

したがって、大気が厚くなると宇宙空間に放熱できる高度が高くなります。それよりも低いところの大気温度は温度減率に従って上昇するため、大気が厚いほど地表面温度は上昇します。

例えば、金星の表面温度は  $740\text{K}$  ( $467^\circ\text{C}$ ) と高温です。愚かな気象学者は「金星大気の組成に占める  $\text{CO}_2$  の割合が  $96\%$  と高いために温室効果で高温になっている」と主張していますが、それは間違いです。金星は大気が厚く、地表面の気圧が  $90$  気圧を超えています。大気が厚いために大気温度が放射平衡温度を示す高度が高いために、それより下の大気温度は断熱圧縮によって金星大気の温度減率  $\approx 9.1$  ( $\text{K/km}$ ) に従って上昇するために高温になるのです。大気組成に占める  $\text{CO}_2$  割合が高いために高温になっているわけではありません。

#### (4) 水蒸気 $\text{H}_2\text{O}$ 、二酸化炭素 $\text{CO}_2$ の赤外活性

赤外線を放射、吸収する気体分子の性質を赤外活性と呼びます。ここでは地球大気の主要な赤外活性気体である水蒸気  $\text{H}_2\text{O}$  と二酸化炭素  $\text{CO}_2$  について少し詳しく見ておくことにします。

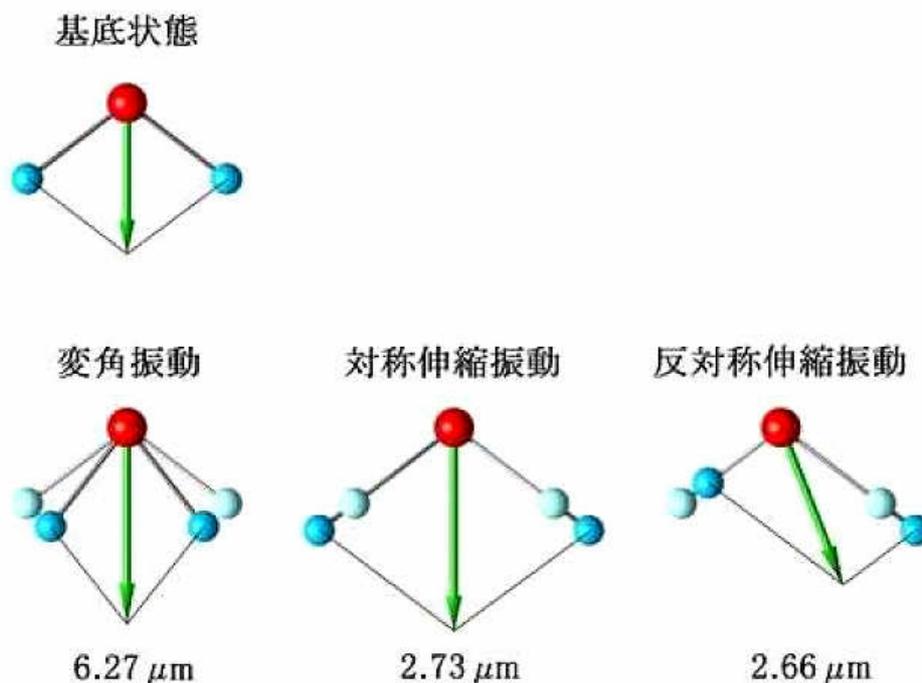


図 2-19 水蒸気  $\text{H}_2\text{O}$  の振動モード

図 2-19 に  $\text{H}_2\text{O}$  について、基底状態の構造と振動モードの模式図を示します。図の緑の矢印は電気双極子モーメントです。

H<sub>2</sub>O は基底状態で電気双極子モーメントが 0 ではありません。これは分子内に電氣的な偏りがあることを示しています。このような分子を極性分子と呼びます。

気体分子が赤外線を放射・吸収するのは、気体分子の運動に伴って、電場が加速度的に変化するためです。気体分子の電場が加速度的に変化する運動モードは極性分子の回転運動と、振動運動です。

H<sub>2</sub>O 分子は、基底状態の電気双極子モーメントに直交する二つの軸周りの回転モードと、すべての振動モードで電場が加速度的に変化することで赤外線を放射・吸収します。

回転モードでは概ね 15 μm よりも長波長側の広範囲の赤外線を放射・吸収します。変角振動、対称伸縮振動、反対称伸縮振動の基本振動でそれぞれ 6.27 μm、2.73 μm、2.66 μm の赤外線を放射・吸収します。

実際には気体分子は空間中を移動しているためにドップラー効果や分子間の相互作用によって放射・吸収スペクトルは線スペクトルにはならず、ある程度の幅を持つ分布になります。

図 2-20 に CO<sub>2</sub> について、基底状態の構造と振動モードの模式図を示します。

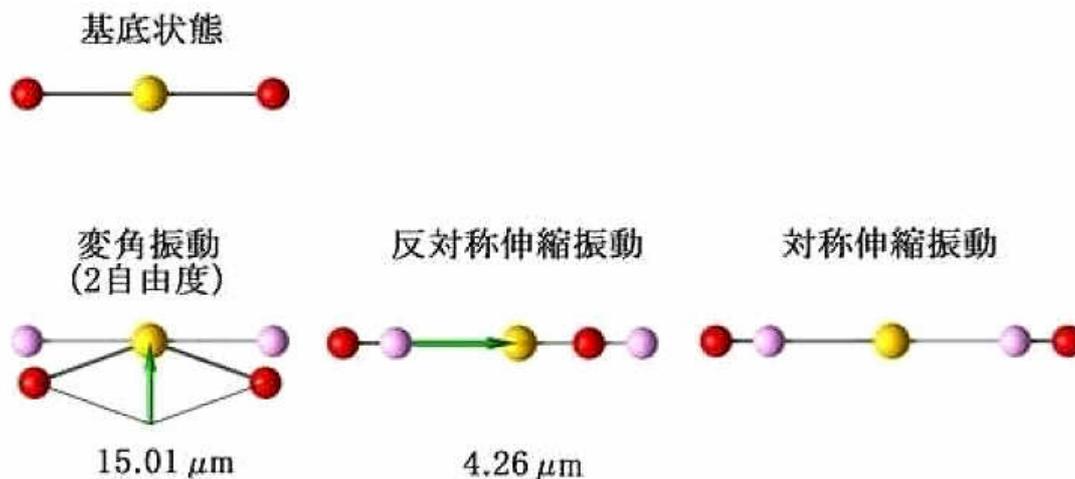


図 2-20 二酸化炭素 CO<sub>2</sub> の振動モード

CO<sub>2</sub> は基底状態では電気双極子モーメントが 0 であり、無極性分子です。したがって回転モードでは赤外線の放射・吸収は起こりません。変角振動、反対称伸縮振動の基本振動でそれぞれ 15.01 μm、4.26 μm の赤外線を放射・吸収します。対称伸縮振動モードでは電気双極子モーメントが 0 なので赤外線の放射・吸収は起こりません。

図 2-21 に太陽放射と地球放射の放射スペクトルの分布と、標準的な H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> の電磁波に対する吸収率のスペクトルを示します。ただし、放射スペクトルの強度のスケール（縦方向）は実際の強度を反映していないので注意してください。

太陽放射の主要部分は波長 0.5 μm を中心とする可視光線の範囲にあります。H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> の吸収帯は可視光線の範囲にはほとんどありません。雲のない場所では、太陽放射の主要部分である可視光部は、ほとんど大気中で減衰することなく地表面にまで到達します。

太陽放射の赤外線部分の一部は大気中の H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> によって直接吸収されます。

地球放射は波長 10 μm 付近を中心とする赤外線です。

H<sub>2</sub>O の吸収帯は地球放射スペクトルの分布範囲の大部分で高い吸収率を持っていますが、8 μm～13 μmの範囲では 50%を下回っています。

CO<sub>2</sub>は地球放射スペクトルの主要部では 15 μm付近に高い吸収率を示す帯域があります。

地球大気の二つの主要な赤外活性気体の吸収帯を重ねても、8 μm～12 μmの範囲では吸収率が低く、地球放射を十分に捕らえることが出来ないことが分かります。この範囲を地球放射に対する「大気の窓」と呼ぶことがあります。

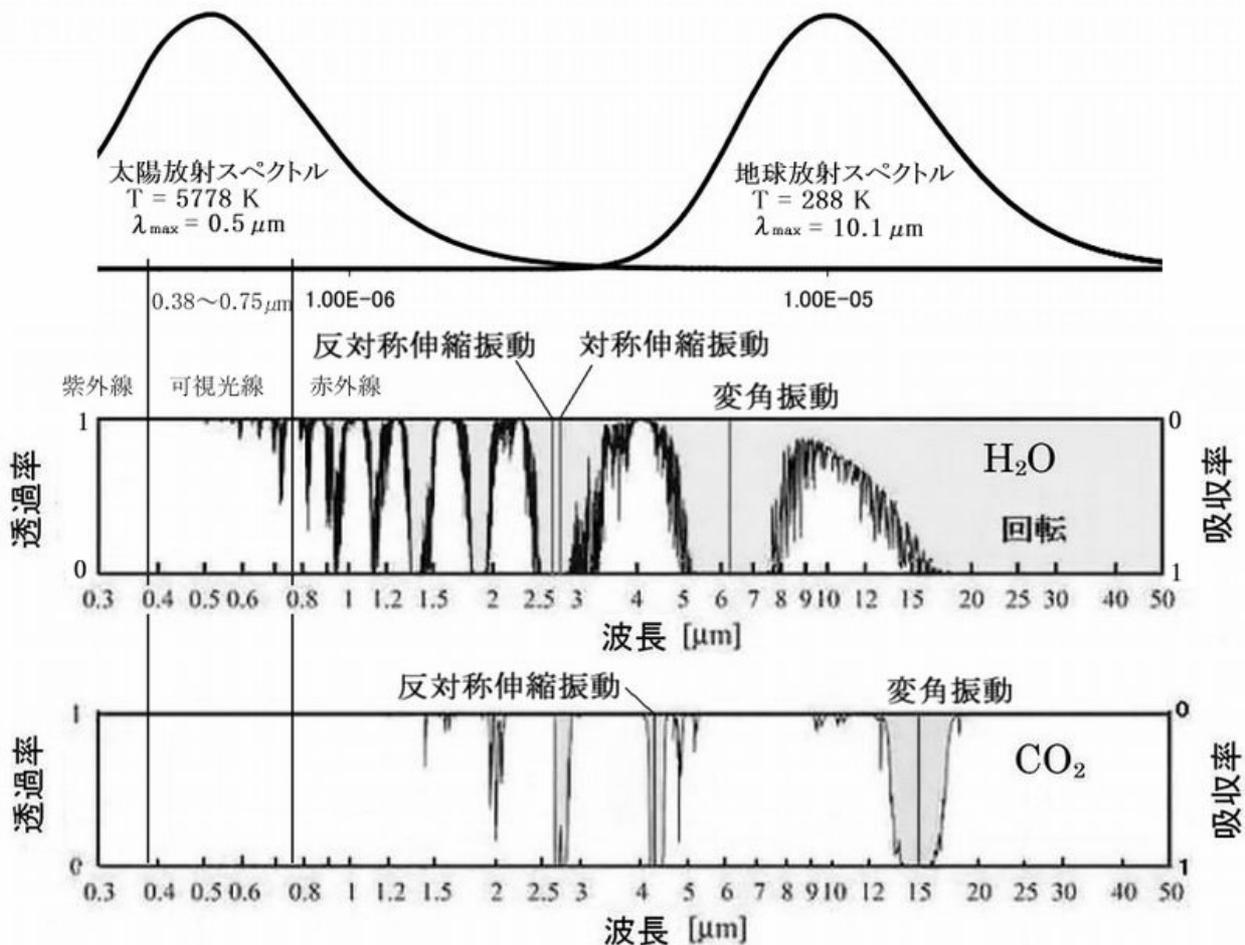


図 2-21 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>の放射・吸収スペクトル

ここで一つ注意することがあります。15 μm付近では、H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> の吸収率はいずれも 1.0 程度です。H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> を両方含む地球大気の吸収率はどうなるのでしょうか？吸収率の定義は黒体放射に対する吸収率であり、1.0 を超えることはありません。

CO<sub>2</sub> 温暖化の世俗的な説明の中では、吸収率が 1.0 になっても CO<sub>2</sub> 濃度が更に高まれば放射・吸収の「回数」が増えていくだけでも温暖化するというものがありますが、意味不明です。

既に放射線吸収帯の中心部分で吸収率が 1.0 に到達している場合、更に大気中濃度が大きくなると吸収帯域の幅が多少広がることとなります。

以上で考えてきたのは、地球大気に雲のない晴天部分での地球大気の放射に対する吸収特性です。実際には、地球の表面積の 30%～50%は常時雲に覆われています。

雲があると太陽放射は反射されるために地表面に到達する有効放射が減少します。これは雲による「日傘効果」と呼ばれ、気温低下の大きな要因です。

一方、雲は地球放射を吸収します。雲があると地球大気の「大気の窓」はふさがれてしまい、地球放射はほぼ完全に吸収されます。これは気温の上昇要因です。

あるいは、雲が無くても大気中の水蒸気濃度が高くなると極性分子である水分子は水素結合でクラスターを形成すると考えられます。春や夏の空が冬や秋の空に比べて白っぽく見えるのは、水蒸気クラスターによるミー散乱の影響です。水蒸気クラスターは「大気の窓」領域の地球放射も吸収すると考えられます。したがって、実際には「大気の窓」はそれほど大きくありません。

### (5) キルヒホッフの法則

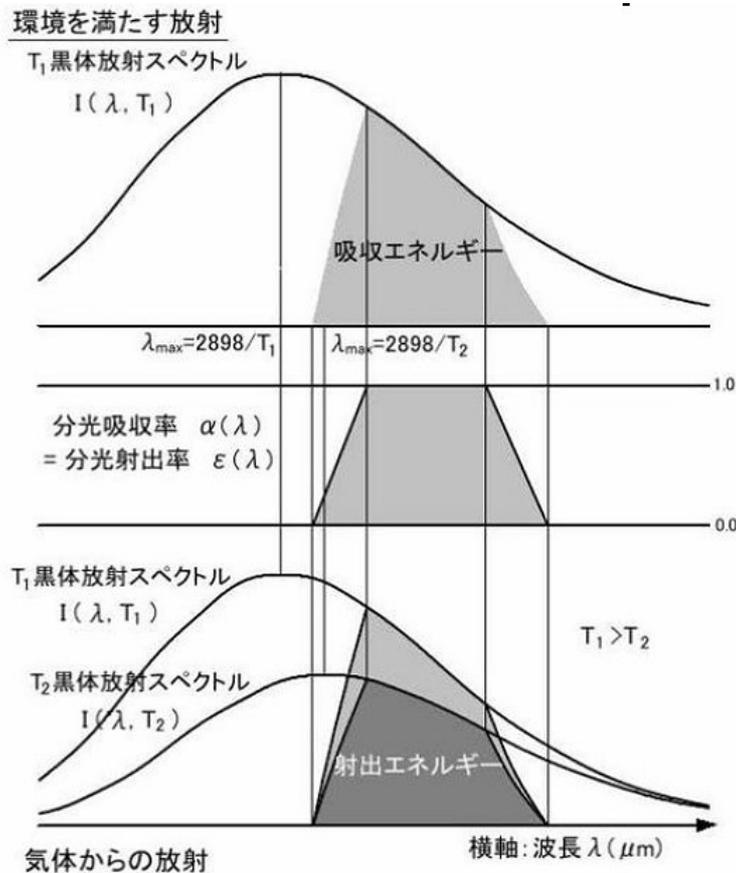


図 2-22 分光吸収率と分光射出率

ステファン・ボルツマンの法則についてももう一度考えることにします。黒体に対して、ステファン・ボルツマンの法則は次の通りです。

$$I = \sigma \cdot T^4$$

黒体放射は温度  $T$  が決まると波長  $\lambda$  に対する放射のスペクトルが決まります。これを  $I(\lambda, T)$  と表すことにします。ステファン・ボルツマンの式の  $I$  は  $I(\lambda, T)$  を波長  $\lambda$  について  $(0, \infty)$  の範囲で積分したものです。

$$I = I(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda$$

黒体ではない放射体の放射を  $I^*$  で表すことにします。温度  $T$  の放射体の放射強度は射出率  $0.0 < \varepsilon < 1.0$  を使って次の様に表せます。

$$I^* = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \varepsilon \cdot I$$

実際には、射出率  $\varepsilon$  は波長  $\lambda$  に対して変化します。ここでは  $\varepsilon(\lambda)$  と表すことにします。 $I^*$  は、黒体の放射スペクトル  $I(\lambda, T)$  に重み  $\varepsilon(\lambda)$  をかけて波長  $\lambda$  について  $(0, \infty)$  の範囲で積分することで求めることができます。

$$I^* = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \varepsilon \cdot I = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda$$

温度  $T$  に対する射出率を  $\varepsilon(T)$  は次の様に表すことができます。

$$\varepsilon = \varepsilon(T) = \frac{I^*}{I} = \frac{\int_0^{\infty} I(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda} < 1.0$$

次に黒体ではない放射体の電磁波に対する吸収率を考えます。温度  $T$  の黒体放射を  $I$  として、これを受ける放射体の吸収する放射  $I^{**}$  は吸収率  $0.0 < \alpha < 1.0$  を使って次の様に書くことができます。

$$I^{**} = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4 = \alpha \cdot I$$

実際には吸収率  $\alpha$  は波長  $\lambda$  の関数なので  $\alpha(\lambda)$  と表すことにします。

$I^{**}$  は、黒体の放射スペクトル  $I(\lambda, T)$  に重み  $\alpha(\lambda)$  をかけて波長  $\lambda$  について  $(0, \infty)$  の範囲で積分することで求めることができます。

$$I^{**} = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4 = \alpha \cdot I = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda$$

温度  $T$  に対する吸収率  $\alpha(T)$  は次の様に表すことができます。

$$\alpha = \alpha(T) = \frac{I^{**}}{I} = \frac{\int_0^{\infty} I(\lambda, T) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda} < 1.0$$

今、黒体ではない放射体の温度  $T$  における射出率を  $\varepsilon(T)$ 、吸収率を  $\alpha(T)$  とします。放射体は温度  $T$  で熱力学平衡状態にあるとします。この放射体が  $I^*$  を放射し、同時に  $I^{**}$  を吸収して熱力学平衡状態になるためには次式が成り立つことが必要です。

$$I^* = I^{**} = \varepsilon(T) \cdot I = \alpha(T) \cdot I \quad \therefore \varepsilon(T) = \alpha(T)$$

この関係をキルヒホッフの法則と言います。その意味は、「黒体ではない放射体の任意の温度  $T$  に対する射出率は吸収率に等しい」ということです。

任意の温度に対して上式が成り立つための条件は次式で表すことができます。

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda)$$

つまり、放射体の射出率  $\varepsilon(\lambda)$  の分布は吸収率  $\alpha(\lambda)$  の分布と等しいのです。

実際の放射体では射出率、吸収率は波長に対して値が変化します。しかし、温度  $T$  において便宜上すべての波長に対して同一の射出率  $\varepsilon(T)$ 、吸収率  $\alpha(T)$  を想定した仮想の放射体を灰色体と呼びます。気象シミュレーションの計算を簡略化するために用いられる灰色大気とはそのような仮想の大気です。

この仮想の灰色大気を考え方を実際の赤外活性気体の性質だと勘違いしている方がいるようです。

例えば、ペットボトルに乾燥空気と  $\text{CO}_2$  を充填し、それに太陽光に当てることでその温度変化を比較することで  $\text{CO}_2$  の温室効果を示す実験などというものが本当に行われていたようです。

読者諸兄は既にお分かりでしょうが、乾燥空気だけでなく、 $\text{CO}_2$  も太陽放射に対してはほとんど大きな吸収帯域がないため計測できる温度差が生じることはありません。

おそらくこの実験を企図した方は、 $\text{CO}_2$  の放射に対する吸収率が全波長について同一であると考え、波長に対する依存性があることを全く考えなかったのでしょう。

しかしこの実験のもっと重大な問題は、充てんした気体ではなくペットボトル容器の方が太陽放射によって温まり、充てんした気体の温度はペットボトルの温度と同じになってしまうということを全く考えなかったことです。放射伝熱についての基本的知識の欠如というほかありません。

これは科学実験などと呼べるものではないでしょう。 $\text{CO}_2$  地球温暖化説の蔓延による自然科学教育の劣化はとても危険です。

## (6) 大気の下端と上端の放射

これまで、温室効果と呼ばれている現象を理解するための自然科学的な基礎知識について紹介してきました。ここでは地球大気の温室効果の実体を見ていくことにします。まず、実際の大气からの放射スペクトルの観測結果を示すことで、温室効果の実体を把握することにします。

図 2-23 の左側は、大気下端⇨地表面で観測した大気からの下向き放射のスペクトルの観測値を示しています。大気放射スペクトルは、いずれも晴天日の雲のない場所で観測された結果であろうと考えられます。

左側の上の図には  $288\text{K}=15^\circ\text{C}$  の黒体放射が破線で示されています。これは、地表面温度  $15^\circ\text{C}$  の地表面放射と考えてよいでしょう。

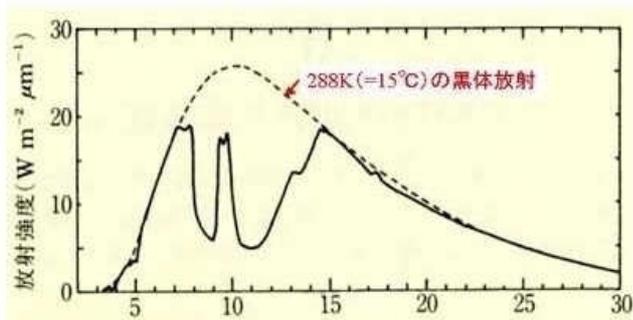
実線で示された大気下端の大気から放射された下向き放射は、大気の窓領域以外の部分では  $288\text{K}$  の黒体放射と良い一致を見せています。これは地表付近の大気温度が  $288\text{K}$  に近いことを示しています。

キルヒホッフの法則から、この大気下端の下向き放射は  $288\text{K}$  の地表面放射に対する地表面付近の大気の吸収スペクトルを示していると考えることが出来ます。大気の窓では地球放射の一部が大気に捕捉されずに透過していることが分かります。この大気を透過する地表面

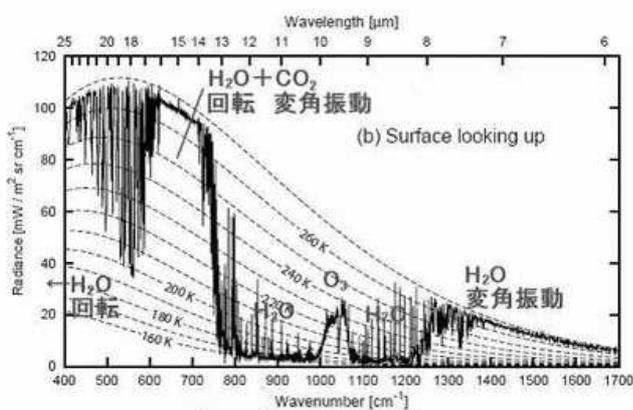
放射が「放射冷却」と呼ばれるものです。

大気の窓以外の帯域では殆ど大気地表面放射に対する吸収率は 1.0 に近い値を示していることから、地表面付近の大気の湿度は標準的な値であろうと推測できます。

大気下端下向き放射



近藤純正 著「地表面に近い大気の科学」より



大気上端上向き放射

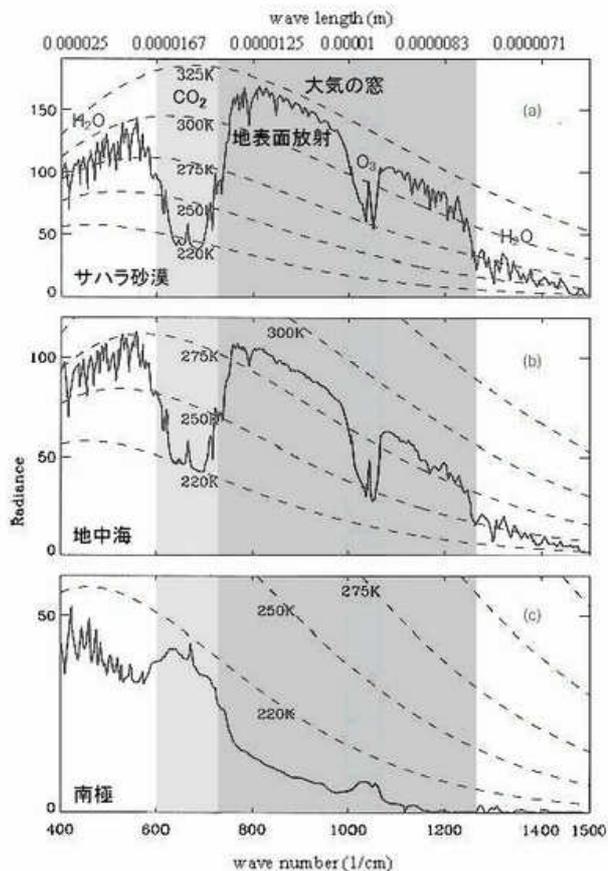


図 2-23 大気放射、地表面放射の観測値

左側の下の図（波長の座標軸の正方向が上の図と逆なので注意）はかなり様相が異なります。15 μm 付近の H<sub>2</sub>O と CO<sub>2</sub> の吸収帯が重なっている吸収率 1.0 の帯域の大気放射スペクトルの値は、270K の黒体放射スペクトルを示す破線よりも少し低い値です。したがって、観測地点の地表面付近の大気温度は 270K 程度の氷点下の気温であることが分かります。

また、15 μm よりも長波長側の H<sub>2</sub>O の回転モードによる吸収スペクトルが不安定であることが分かります。

以上から、観測地点は寒冷で大気中の H<sub>2</sub>O 密度が小さいことを示しています。この観測値は強い放射冷却現象が起こっていることを示しています。特に、上の図と大気の窓の放射スペクトルを比較すると大きな違いが分かります。ここでは大気の窓の地表面放射はほとんど大気に吸収されずに透過しています。

右側の大気上端上向き放射はいずれも観測衛星ニンバスによる観測結果です。いずれの観測値も雲のない場所の観測値です。

この大気上端の上向き放射を見るときに幾つかの注意点があります。

まず注目すべきは 15 μm 付近の CO<sub>2</sub> による放射です。左側の図で見たとおり、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は 15 μm 付近の地表面放射を完全に吸収するのに十分な密度であることが分かっています。したがって、大気上端の上向き放射には 15 μm 付近の地表面放射は含まれていません。観測されているのは上層大気に含まれている CO<sub>2</sub> の熱放射です。CO<sub>2</sub> の 15 μm 付近の射出率は 1.0 なので、CO<sub>2</sub> による上向き放射の強さから、上向き放射をする大気の温度が推定できます。

右側最上段のサハラ砂漠の観測値、中段の地中海の観測値、下段の南極の観測値は、いずれも 220K の黒体放射スペクトルに近い値を示しています。つまり、大気からの上向き放射は、大気温度が 220K 程度を示す高度付近の大気からの放射であると推定できます。

次に、三つの観測結果はいずれも晴天域で観測されたものであることから、8~12 μm 付近は大気の窓からは地表面放射があまり大気に吸収されずに観測されていることとなります。特にサハラ砂漠と南極は大気中の H<sub>2</sub>O 密度が小さいために地表面放射の大部分がそのまま大気を透過して観測されていると考えられます。したがって、大気の窓の放射の強さから地表面の温度がある程度推定できます。

地表面温度は、サハラ砂漠では 320K (47°C) 程度、地中海の海面温度は 285K (12°C) 程度、南極の氷原の温度は 200K (-73°C) 程度だと推定できます。興味深いのは南極の大気上端の上向き放射の観測値です。南極では地表面温度（氷原の表面温度）の方が大気上層よりもはるかに低温であるためにこのような特異な分布になります。

15 μm から長波長側の放射についてはサハラ砂漠と地中海では 15 μm 付近の CO<sub>2</sub> による放射よりも大きな値が観測されています。これは、大気中の H<sub>2</sub>O 密度が低く、放射冷却現象が起こっており、地表面放射の多くが大気を透過し、それに加えて大気上層の H<sub>2</sub>O からの放射が加わったものと考えられます。

南極においても強い放射冷却現象で地表面の放射の大部分が大気を透過していますが、氷原の表面温度が大気上層よりもはるかに低いためにこのような分布になっています。

### (7) 赤外活性気体の気温に対する効果

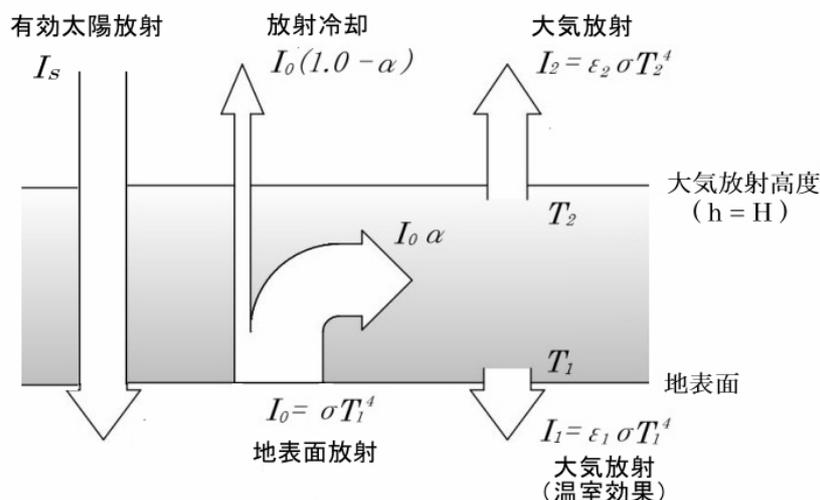


図 2-24 地球大気の放射平衡モデル

本節では、大気に含まれている赤外活性気体の効果（これを一般には温室効果と呼ぶようですが・・・）について図 2-24 に沿って考えていくことにします。

図 2-24 では、話を単純にするために大気による太陽放射の吸収、地表面と大気の熱伝導、地表面からの蒸散による潜熱の供給については省略しています（註：熱伝導の効果はそれほど小さくなく、蒸散による潜熱は主に大気上層の凝結熱の放熱による気温減率の低減に影響しますが、大気下端の下向きの熱放射には影響しません。）。

「2-3(2)黒体放射と熱放射」で示した図 2-17 との違いは、地表面放射の一部を赤外活性を持つ大気が吸収し、大気は温度によって定まる熱放射を行うことです。

地表面の温度を  $T_1$  とすると、地表面放射は黒体放射で近似することとして次の値になります。

$$I_0 = \sigma \cdot T_1^4$$

地表面におけるエネルギーの平衡条件から地表面放射の強さは太陽からの有効放射と大気からの下向き放射の合計と等しくなるため、次の式が成り立ちます。

$$I_0 = I_s + I_1 \quad \text{ただし、} \quad I_1 = \varepsilon_1 \cdot I_0$$

地表面と地表面に接する大気の温度は等しいと考えてよいでしょう。また、「2-3(5)大気の下端と上端の放射」で示した大気下端からの下向きの熱放射スペクトルもこれを裏付けています。

キルヒホッフの法則から大気の電磁波に対する吸収率＝大気からの電磁波の射出率なので次式が成り立ちます。

$$\alpha = \varepsilon_1$$

地表面からの赤外線放射  $I_0$  の内の  $\alpha \cdot I_0$  が大気に含まれる赤外活性気体によって捕捉されることで大気の保有するエネルギー量が増加します。

赤外活性気体の大気組成に占める割合は平均的には 1% よりも小さい値です。99% 以上は赤外線を放射・吸収する性質を持たない窒素  $N_2$  と酸素  $O_2$  です。

赤外活性気体が捕捉した地表面放射のエネルギーは、密度の高い局所熱力学平衡状態にある下層大気の中で頻繁に起こる分子衝突を介して、速やかに大気を構成する全ての気体分子に等分配されます。

1 気圧常温の大気中では、気体分子は平均  $1.3 \times 10^{-10}$  秒に 1 回程度の頻度で分子衝突を起こしています。1 秒間では 70 億回以上の衝突が起こっていることとなります。したがって、赤外活性気体に捕捉された地表面放射のエネルギーは分子衝突を介して、ほとんど瞬時に赤外活性を持たない気体分子にも均等に分配されることとなります。

こうして、大気の平均的なエネルギー量が上昇することで並進運動速度が上昇し、大気下端の温度≒気温は  $T_1$  に上昇します。

大気中の気温の鉛直分布は、平均的には  $-6.5\text{K/km} = -6.5^\circ\text{C/km}$  の温度減率で低下します。局所熱力学平衡状態にある大気中では、各高度の大気温度にしたがって熱放射が起こ

っています。気体分子からの熱放射は上下方向だけでなくあらゆる方向に等方的に放射されます。

通俗的な CO<sub>2</sub> 地球温暖化説では、大気からの赤外線放射・吸収の回数が増えて大気温度が上昇するなどという愚かなことがまことしやかに語られています。放射・吸収の回数がいくら増えようとも受け渡されているエネルギーの量は不変です。また、熱放射は赤外活性を持つ気体の中では常時起こっている現象であり、放射・吸収の回数など無意味です。

ある程度の高度に達すると大気からの上向きの熱放射が他の赤外活性気体に吸収されずに宇宙空間にまで到達するようになります。

気体には明確な表面が存在しないため、実際にはある程度の高度の範囲の赤外活性気体からの放射が大気圏外に到達すると考えられますが、話を単純にするために、大気温度  $T_2$  になる高度  $h=H$  からの上向き熱放射で放熱するものとします。大気上層からの熱放射は次の通りです。

$$I_2 = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4$$

地球の温度状態が定常的である条件は、太陽からの有効放射と、大気に捕らわれなかった透過地表面放射と大気上層からの上向き熱放射の和が等しくなることです。この条件は次の様に表すことが出来ます。

$$I_s = I_0 \cdot (1 - \alpha) + I_2$$

この条件を満足する大気温度  $T_2$  が決まります。

上空から観測した上向き放射は、

- ①大気を透過した地表面放射
- ②上層大気（雲頂からの放射も含む）からの上向き熱放射

の合計です。国立環境研の横島氏が言うように、地表面放射から大気上層で観測した上向き放射を差し引くことで、彼らの言う「温室効果」の強さを求めることは出来ません。

[https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/11/11-2/qa\\_11-2-j.html](https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/11/11-2/qa_11-2-j.html)

大気による地球放射の吸収＝温室効果を知るためには、地表面で下向きの大気放射を観測すれば良いのです。キルヒホッフの法則から、これが大気による地表面放射の吸収量に一致するからです。

大気上層からの上向き熱放射  $I_2$  の温度  $T_2$  とその高度  $h = H$  が決まるとそれよりも下方の大気温度は標準的な温度減率で上昇するために地表面の大気温度  $T_1$  は次の様に決まります。

$$T_1 = T_2 + 6.5H$$

以上が地球大気に赤外活性がある場合に地表面温度≒気温が高くなる構造です。

結論として、大気中の赤外活性気体による気温上昇は、大気による地表面放射の吸収量によって評価することが出来ることが分かります。つまり、大気の地表面放射に対する吸収率

$\alpha$  によって評価できるのです。

ここでの説明では単純なモデルを用いましたが、赤外活性気体による気温上昇という現象は、地表面放射のどれだけが気層を透過して宇宙空間に放熱できるのかという問題に尽きるのです。

### (7) CO<sub>2</sub>による地表面放射の吸収

地球大気の地表面放射の吸収に対する CO<sub>2</sub>の寄与について考えることにします。

図 2-25 は 255K と 288K の黒体放射スペクトルと地球大気に含まれる赤外活性気体の電磁波に対する吸収率スペクトルを示しています。赤外活性気体は上からメタン CH<sub>4</sub>、オゾン O<sub>3</sub>、二酸化炭素 CO<sub>2</sub>、水蒸気 H<sub>2</sub>O、そして最下段はこれらを含む地球大気です。

図から地球大気の遠赤外線波長帯域の電磁波の吸収は圧倒的に H<sub>2</sub>O に依存していることが分かります。

H<sub>2</sub>O 以外では 10 μm 付近の O<sub>3</sub> と 15 μm 付近と 4.26 μm 付近の CO<sub>2</sub>による吸収が主要なものです。

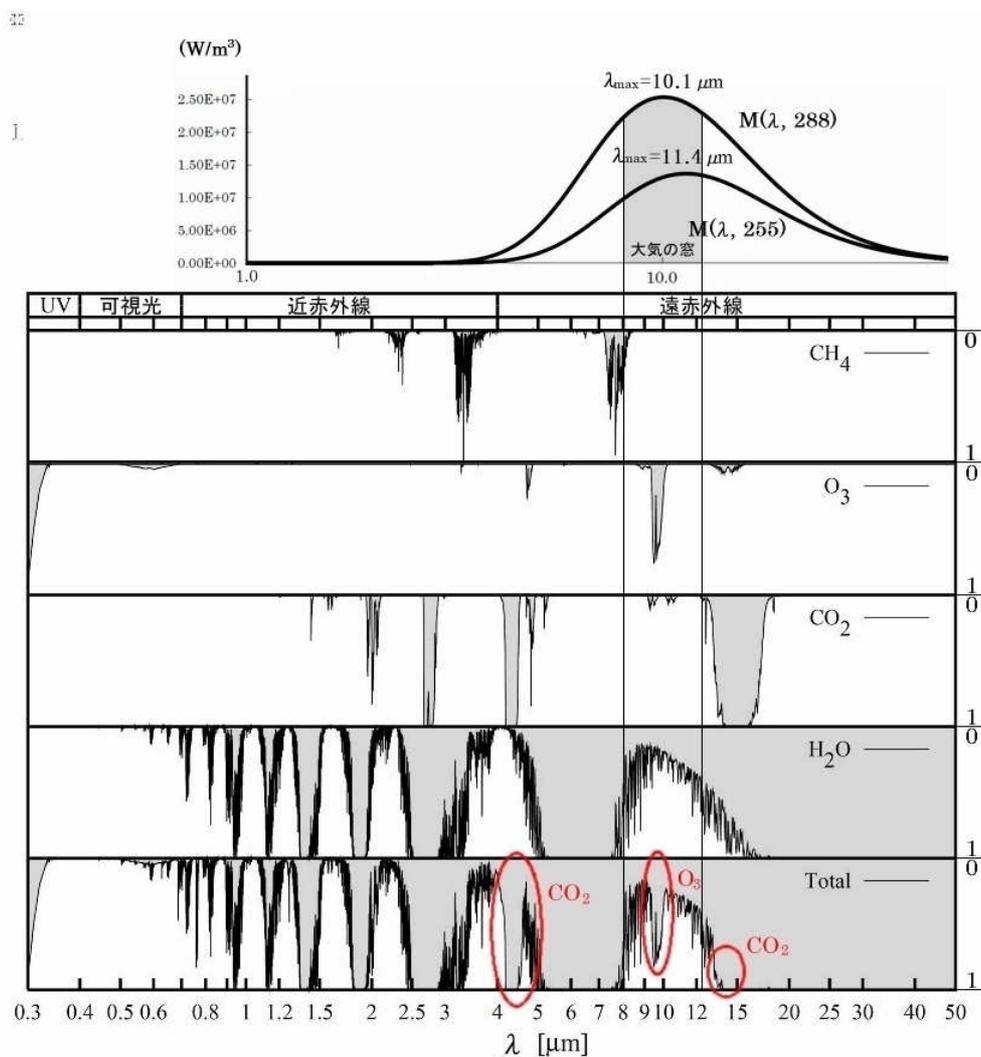


図 2-25 地球大気の主要赤外活性気体の吸収率スペクトル

現在、CO<sub>2</sub>による温室効果が異常にクローズアップされて紹介されていますが、大気の赤外線吸収全体に占める割合はごく小さいことが分かります。

4.26 μm付近では 288K の地表面放射の値自体が小さく、それほど大きなエネルギーを吸収していません。15 μm付近では、H<sub>2</sub>O の回転に対する吸収帯と重なる部分も多く、13~15 μmの一部を吸収している程度です。水蒸気濃度の高い熱帯や温帯の夏では大気の窓は更に狭くなっているため、15 μm付近の CO<sub>2</sub>の影響は無視できます。また、雲に覆われた地域では大気の窓は完全にふさがれるため、CO<sub>2</sub>の影響は無視できます。

地表面放射に対する CO<sub>2</sub>による吸収はそれほど多くはなく、大気による地表面放射の総吸収量に対して数%程度であろうと考えられます。

地表面放射の吸収において大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の増加がどの程度影響する可能性があるのか、地球の生態系に脅威となるような気温上昇を起こす可能性があるのかを見ておくことにします。

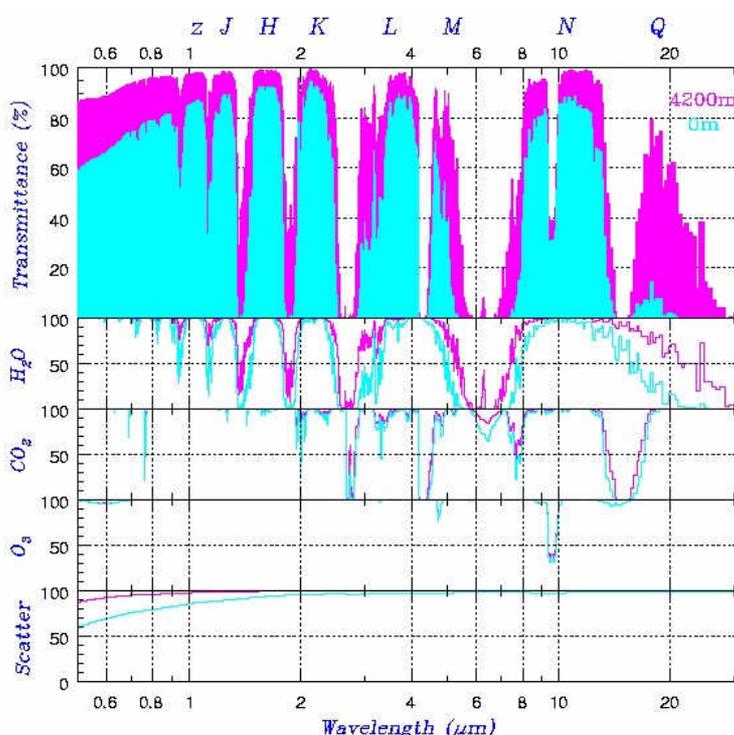


図 2-26 高度変化による赤外活性気体の吸収率スペクトルの変化

図 2-26 は、京大理学部宇宙物理教室の岩室さんのホームページから、観測天文学「大気と波長帯」に掲載されているものです。

この図には、地表面（高度 0m）と高度 4200m の大気の赤外線領域の透過率が示されています。大気の赤外線透過率と赤外線吸収率の合計は 1.0 なので次式が成り立ちます。

$$\text{赤外線吸収率} = 1.0 - \text{赤外線透過率}$$

1.0 から水色の部分を差し引くと地表面の大気の赤外線吸収率であり、桃色の部分まで差し引くと高度 4200m における赤外線吸収率です。

標高が高くなると気圧の低下に比例して気体密度が低下します（気体濃度ではないことに

注意)。地表面の気圧を 1013hPa としたときの高度 4200m の気圧は 600hPa 程度です。したがって、高度 4200m の CO<sub>2</sub> の密度は地表面の密度の 600/1013 倍=0.592 倍程度に下がります。

仮に地表面における CO<sub>2</sub> 濃度が 400ppm であるとする、4200m では 400ppm×0.592=237ppm 相当の気体密度です。

図 2-26 から、地表面放射に対する CO<sub>2</sub> の主要な吸収帯域である 4.26 μm と 15 μm 付近に対応する CO<sub>2</sub> の透過率の地表面と高度 4200m の変化 (水色の線と桃色の線の差) はごく小さいことが分かります。

産業革命以前の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度は 285ppm 程度なので、現在の高度 4200m 地点よりも CO<sub>2</sub> の大気中密度は高かったこととなります。つまり、産業革命以前と現在の地表面大気に対する CO<sub>2</sub> の吸収率の変化は、図に示す水色の線と桃色の線の差よりも小さいのです。

このごくわずかな変化によって気温が観測できるほどに上昇することは考えられません。

さらに言えば、産業革命から現在までの大気中 CO<sub>2</sub> 量の増加の 90%以上は自然の変動であり、人為的な影響は 10% 程度ですから、おそらく人為的な影響による吸収線量の変化は図には見えない程度の変化でしかありません。

「産業革命以降の気温上昇の主因は化石燃料の消費による CO<sub>2</sub> 放出による大気中濃度上昇による付加的な温室効果の上昇によって起こる」という人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説は幻です。

### 3. 幾つかの気温の変動要因

2章において人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説について検証してきました。その結果、自然科学的に大気中の CO<sub>2</sub> 濃度上昇によって顕著な気温上昇が起こる可能性はないことが分かりました。

特に、産業革命以後の人為的な化石燃料消費に付随する CO<sub>2</sub> 放出による大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇はごくわずかであり、人為的な CO<sub>2</sub> 放出による顕著な気温上昇は存在しないことが確認できました。

したがって、温暖化を防止するという名目で行われている脱炭素化という対策は全く無意味です。それどころか、むしろ脱炭素化政策は工業生産規模を爆発的に拡大させることで資源を浪費するばかりでなく環境を悪化させるものです。

その一方で、温暖化対策、脱炭素化という幻想によって大衆を騙し、不必要な新規工業分野を拡大し、その負担を有無を言わずに大衆に支払わせることで企業はさらに膨張しようとしているのです。

気候変動枠組み条約、パリ協定はこれを目論む先進工業国によって仕掛けられた仕組みなのだという事に気付かなければなりません。

地球の気象現象に対する自然科学的な理解はまだ未熟です。気象現象とは、地球上で起こっているすべての物理・化学・生物現象、更に地球外からの影響の総体です。これらのすべてを理解することもまだまだ時間がかかることは間違いありませんし、永久に理解できないことも大いに考えられます。

天気予報のごく短期の将来予測精度が高くなったのは、衛星観測を含めて気象観測網の充実によるデータ量の増大によるものであり、気象シミュレーションが自然科学的に進歩した結果ではありません。一週間先の天気予報は現在でもほとんど正しくないのは、ご承知の通りです。

JAMSTEC で気象シミュレーションに携わっていた元国立沖縄高専教授の中本正一朗氏の言葉を借りれば、「気象学はあまりにも影響する分野が広すぎて、閉じた学問にはなり得ない」のです。将来的にも気象予測シミュレーションが実現することはあり得ません。

噂をしていたら、中本さんから久々に電話をいただきました。中本さんは現在ある英文論文の仕上げに入っているそうです。電話の中で「局所熱力学平衡」という状態があり得るのかと問われました。

実はこのところこの問題に関連することについて考えていました。局所熱力学平衡とは、気体の温度や状態を数学的に確定するための便宜的な仮定に過ぎないのではないのか・・・？

少なくとも地表面付近の大気や宇宙空間に放熱する上層大気の中は熱力学的には非平衡であるからこそ熱の流れがあるのではないか、などと考えていました。

また中本さんいわく、流体力学はニュートン力学の拡張の様に見えるが、現実には幾多の近似や仮定が無ければ成り立たないものであり、一般的に正しい解を求めることが出来ないと述べられています。

厳密な話は中本さんにお任せして、私はごく常識的な科学知識の範囲で考えていくことに

します。中本さんの論文が公開されましたら、解題をここでも紹介したいと考えています。

さて、3章では、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説から離れて、実際に起こっている気温変動について、人為的な影響を含めて、幾つかの自然科学的な要素を紹介することにします。

### 3-1 地球の大気・表面環境の熱収支

#### (1) 熱収支の概要

地球の大気・表面環境の熱収支の概要を図に示します。

地球に到達する太陽放射を大気圏外で観測した値は  $1366\text{W/m}^2$  程度です。これを地球の表面が均等に受け取るとした場合の放射エネルギー密度は  $341.5\text{W/m}^2$  です。図 3-1 では  $341.5\text{W/m}^2$  を 100 とした場合の相対的な値を示しています。

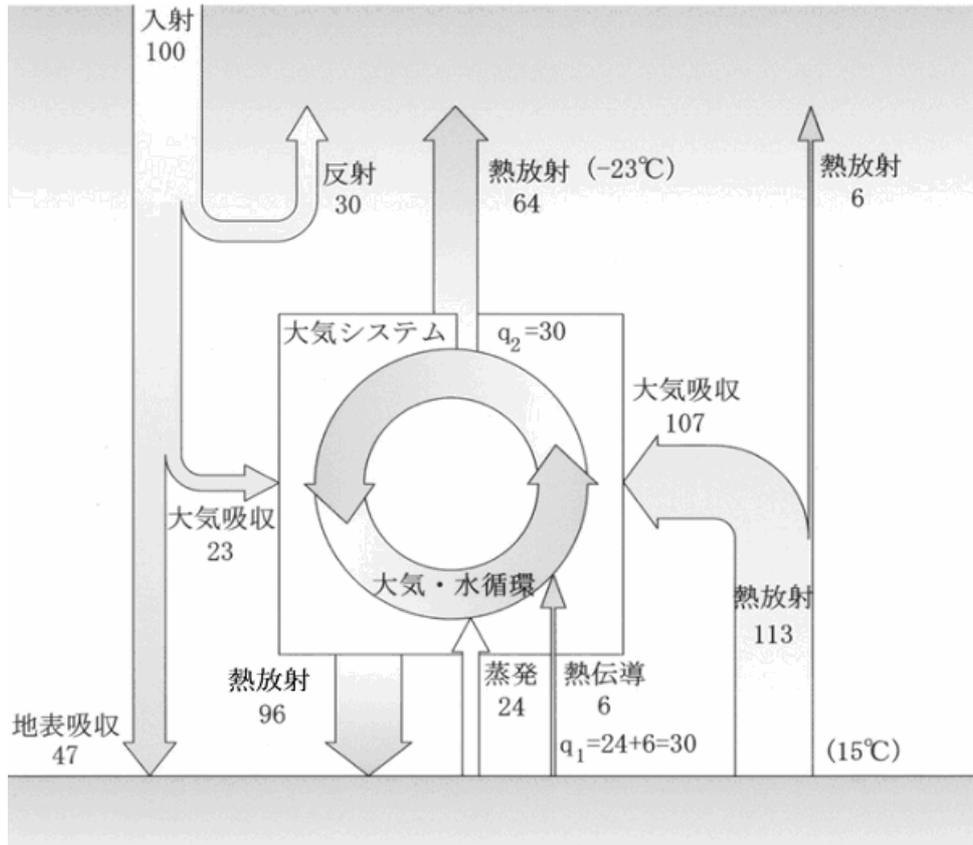


図 3-1 大気の熱収支

太陽放射の 30 は大気や地表面で反射されます。反射されなかった 70 を「有効太陽放射」と呼ぶことがあります。太陽放射の赤外部の帯域で 23 が直接大気に吸収されます。残りの 47 が地表面にまで到達します。

地表面は太陽放射の 47 と大気からの下向き熱放射（温室効果）で 96 を受け取ります。地表面は合計で  $47+96=143$  を受け取ります。

143 の放射エネルギーを受け取った地表面は、地表水ないし海洋からの水の蒸発による潜熱で 24、大気への熱伝導で 6、赤外線放射で 113、合計で 143 の熱を放出します。赤外線放射のエネルギー密度は、

$$341.5(\text{W}/\text{m}^2) \times \frac{113}{100} = 385.9(\text{W}/\text{m}^2)$$

なので、放射平衡温度は次のように計算できます。

$$\sqrt[4]{\frac{385.9}{5.67 \times 10^{-8}}} = 287.2(K) = 14.2(^{\circ}\text{C}) \doteq 15(^{\circ}\text{C})$$

これが地表面に接触している大気の温度≒気温が 15°Cと言われる理由です。

地表面ないし海面からの蒸発による潜熱の放出量は次の通りです。

$$341.5(W/m^2) \times \frac{24}{100} = 82(W/m^2) = 82(J \cdot \text{sec}^{-1} \cdot m^{-2}) = 2585952(kJ/(年 \cdot m^2))$$

15°C、1 気圧の水の蒸発潜熱は 2463(kJ/kg)なので、1 年間で蒸発する水の重さは次の通りです。

$$\frac{2585952}{2463} \cdot \frac{kJ}{年 \cdot m^2} \cdot \frac{kg}{kJ} \doteq 1050(kg/(年 \cdot m^2))$$

水の比重を 1.0 とすると 1050 kg は 1.05 m<sup>3</sup> に相当します。1 年間に 1m<sup>2</sup> 当たり 1.05m<sup>3</sup> の水が蒸発するので、水深に換算すると 1.05 m/年=1050 mm/年、つまり、地表面ないし海面から平均的に年間 1050 mm の水が蒸発し、同時に平均的に年間 1050 mm の降雨量があるということです。

地表面から蒸発した水は直ちに大気に熱を放出するわけではありません。地表面で暖められ、水蒸気を含んだ大気は軽くなるため大気中を上昇します。大気は上昇することで断熱的に膨張し、温度が低くなります。

大気の温度が露天に達すると水蒸気は凝結し始めます。この過程で地表面で吸収した潜熱を大気に放出することになります。

大気が乾燥している場合の温度減率は 9.8 (°C/km) ですが、湿潤大気が大気中を上昇することで凝結熱を放出するため温度減率が緩和され、湿潤大気の平均的な温度減率は 6.5 (°C/km) になります。

大気が大気放射と熱伝導によって受け取ったエネルギーは、ただちに分子衝突を介して下層大気全体に均一に分配されます。

地球大気は主に大気層の底面で加熱されるため、低層の大気ほど温位が高く上昇傾向を持つことになります。水蒸気の分子量 18 は大気平均分子量 29 よりも小さいため、水蒸気を含んだ大気は更に軽くなります。

こうして地球の下層大気は対流運動をおこします。大気は上昇するにしたがって H<sub>2</sub>O の凝結熱を放出し、凝結した H<sub>2</sub>O は降水となって地表面に還流します。

水蒸気を失い、乾燥した大気は冷たく重くなり、やがて大気中を上昇できなくなります。対流圏大気の上昇の限界面が「対流圏界面」です。

対流圏の上層大気からの熱放射による地球の平均的な放熱量は次の通りです。

$$341.5(W/m^2) \times \frac{64}{100} = 218.56(W/m^2)$$

放射平衡温度は次の通りです。

$$\sqrt[4]{\frac{218.56}{5.67 \times 10^{-8}}} = 249.2(K) = -23.8(^{\circ}C)$$

気温 15°C、湿潤温度減率を 6.5°C/km とすると、上向き熱放射を行う大気の高さは次の通りです。

$$H = \frac{-23.8 - 15}{-6.5} = 5.97(km)$$

実際には対流圏界面の高度は赤道付近で高く両極で低くなり、また高度や地域による気象条件の違いによって大気赤外線放射率は変化し、また雲の有無などの気象条件によって複雑な影響を受けるため、あくまでもこの高度は一つの目安です。

## (2) 地表水の蒸発量の変化

地表水の蒸発量の変化について考えることにします。

産業革命以降、流通の効率化、あるいは生活の利便性を求めて、巨大都市がつくられ、その表面は不透水性の舗装やコンクリートなどの無機質な資材を使用した建物で覆われるようになりました。

不透水性舗装の上に降った降水は下水道システムで集められ、速やかに排除されるようになりました。これに伴って、都市環境は乾燥化が進んでいます。

私が小学生であった半世紀余り前までは、主要な国道以外はまだまだ路面舗装はそれほどなく、住宅の周辺には田畑や林や野原がありました。不透水性の舗装が施された面積はごく狭いものでした。大量の雨が降ったり、梅雨にはいたるところに水たまりができました。長靴は必需品でした。

私は子供の頃も現在も同じ場所に住んでいます。現在は、家の前の道までも不透水性の舗装が施され、周囲の林や畑や果樹園には住宅が立ち並び巨大な駐車場が幾つも出来て舗装面ではない生きた地表面を探す方が難しいほどになりました。

住宅地や商工業地域ではこの半世紀余りで、地表水の蒸発量が激減しています。地表水の蒸発量が減ることでのどの程度の冷却効果が失われたのかをシミュレーションすることにします。

次頁の図 3-2 は、平均的な地球の熱収支の地表面における熱収支を少し変えたものです。地表面からの蒸発による潜熱の放出量を 24 から 12 に半減させ、その分の熱の放出を地表面放射が代替することにします。

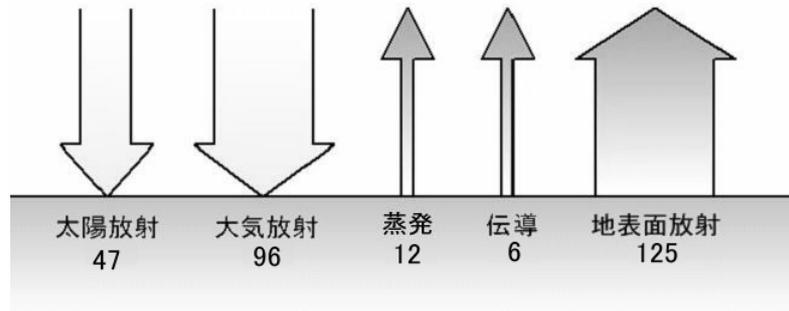


図 3-2 蒸発の減少による地表面の熱収支の変化

地表面放射のエネルギーは次の通りです。

$$341.5(W/m^2) \times \frac{125}{100} = 426.9(W/m^2)$$

放射平衡温度＝地表面温度は次の通りです。

$$\sqrt[4]{\frac{426.9}{5.67 \times 10^{-8}}} = 297.6(K) = 21.6(^{\circ}C)$$

つまり、地球の平均的な環境において、地表面からの蒸発量が 1050 (mm/年) から半分の 525 (mm/年) に減ると、平均気温が 14.2 °C から 21.6 °C に 7.4 °C だけ上昇することになります。

実際には風の流入などで気温上昇はここまで大きくはなりません。しかし、不透水性舗装が一般化した住宅地や商工業地域における気温上昇は、住環境を著しく悪化させる可能性があることは間違いありません。

日本では、地方都市周辺を含めて、都市化された（表面舗装と無機材による建築物）環境に 8 割程度の国民が居住しています。国民の大多数は、生活空間で地表面からの蒸発量の減少による気温上昇を日常として暮らしています。

したがって、日本国民の大多数が肌感覚で感じている気温上昇とは、全地球的な規模で生じてと言われる 1 °C 程度のごくわずかな温暖化現象ではなく、主に地表面環境の乾燥化、地表水の蒸発量の減少による遥かに大きな気温上昇なのです。

### (3) 工業的エネルギー消費の影響

人間の社会生活で消費する化石燃料を主体とする工業的なエネルギーの消費の影響について考えることにします。

工業的なエネルギーは最終的に低温の廃熱になります。工業的エネルギーの総量は、一次エネルギー消費量で測れるものとします。2022 年の 1 年間の世界の一次エネルギー消費量は 604.0(EJ) でした。一次エネルギーには再生可能エネルギー 45.2(EJ) と水力 40.7(EJ) が含まれています。これを除いて正味の工業的エネルギー消費量は以下の通りです。

$$604.0 - 45.2 - 40.7 = 518.1(EJ) = 518.1 \times 10^{18} (J)$$

地球の表面積を 510,100,000 km<sup>2</sup> とすると、地球の表面積 1m<sup>2</sup> 当たりの仕事率に換算す

ると次の通りです。

$$\frac{518.1 \times 10^{18} (J)}{510.1 \times 10^{12} (m^2) \cdot 365 \times 24 \times 3600 (\text{秒})} = 0.0322 (W / m^2)$$

莫大な工業的なエネルギーが消費されていると漠然と考えていますが、単位面積当たりのエネルギー消費量としては、地表面に到達する太陽放射エネルギーに対して、

$$0.032 \div 341.5 < 1/10000$$

程度であり、地球全体の表面環境の温度状態を大きく変化させることはありません。しかし、工業的なエネルギーは都市部の限られた地域で集中的に消費されているため、局所気候に対しては無視できない影響があります。

日本の 2022 年の 1 年間の一次エネルギー消費量は 17.8(EJ) でした。一次エネルギーには再生可能エネルギー (9%) と水力 (4%) が含まれています。これを除いて正味の工業的エネルギー消費量は以下の通りです。

$$17.8 \times (1.0 - 0.09 - 0.04) = 15.486 \times 10^{18} (J)$$

これを日本の国土面積の 30% を占める平野部で消費すると仮定すると仕事率は次の通りです。

$$\frac{15.486 \times 10^{18} (J)}{37.796 \times 10^{10} \times 0.3 (m^2) \cdot 365 \times 24 \times 3600 (\text{秒})} = 4.3 (W / m^2)$$

東京などの大都市では更にこの 5 倍程度のエネルギーを消費すると仮定します。

$$4.3 \times 5 = 21.5 (W / m^2)$$

これを考慮した地表面の熱収支を図 3-3 に示します。地表面の熱放射は次の通りです。

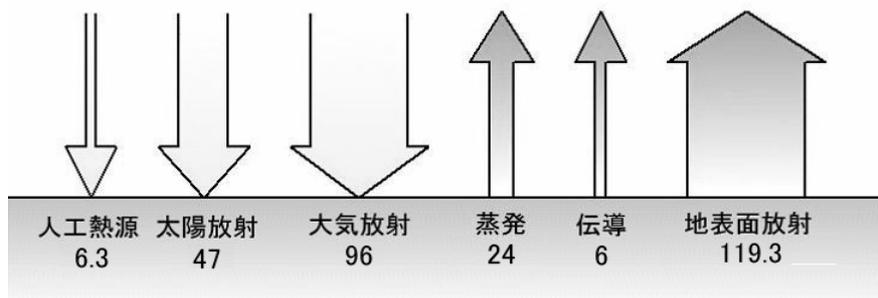


図 3-3 人工熱源による地表面の熱収支の変化

$$341.5 (W / m^2) \times \frac{119.3}{100} = 407.4 (W / m^2)$$

放射平衡温度＝地表面温度は次の通りです。

$$\sqrt[4]{\frac{407.4}{5.67 \times 10^{-8}}} = 291.1(K) = 18.1(^{\circ}\text{C})$$

日本の大都市では、工業的なエネルギーの集中的な使用で平均気温が 14.2°Cから 18.1°Cに 3.9°C上昇することになります。

#### (4) 局所的な影響と大局的な変化

地表面の温度環境に与える人為的な影響について見てきました。都市化による地表面環境の乾燥による気温上昇と工業的なエネルギーの集中的消費による気温上昇は、同じ場所で発生することになります。

図 3-4 地球の夜の衛星写真画像です。写真の光点の密度が都市化の影響の強さを表していると考えてよいでしょう。

都市化された環境の占める面積が地球の表面積に占める割合はそれほど大きくはありません。前回示したように、工業的なエネルギー消費量は平均すると太陽放射から受け取るエネルギーに比較すれば 1/10000 にも満たない微々たる量です。



図 3-4 地球の夜半球の衛星写真

衛星写真を見てまずすぐ目に付くのが南北のバランスです。大陸の配置から、多少のずれはあるものの、南半球は水半球であり、北半球は陸半球です。光点の量、密度とも北半球に集中しています。

更に大陸の中心部には光点は少なく、大陸縁辺部の方が光点密度は高くなっています。

具体的には北半球中緯度の北米大陸の西海岸・東海岸、ヨーロッパ大陸西海岸、日本を含むアジア大陸東海岸に光点が集中しています。

こうした都市化された地域では、表面環境の高温化によって周辺よりも大気の上昇傾向が強くなっている可能性があります。このような地域的な大気の性状の変化によって、地球を

巡る大気の大循環構造にどのような影響が現れるのかは定かではありませんが、気候システムのバランスに何らかの影響を与えている可能性は否定できないように思います。

### 3-2 太陽活動と気温

地球内部熱の放出が小さい氷河期の気温は主に太陽から供給される可視光線を中心とする太陽放射エネルギーによって決まると考えられます。

氷河期の中の寒い時期である氷期と比較的暖かい時期である間氷期の 10 万年のタイムスケールの周期的な変動は太陽を巡る地球の公転軌道の軌道要素の周期的変動＝ミランコビッチサイクルによってうまく説明できそうです。

また最近の短期的な 10 年～数 100 年のタイムスケールの気温変動は太陽の黒点周期に見られる太陽活動の活性度の変動によってうまく説明できそうです。

それでも直近の 3000 年間程継続している 1000 年周期の気温変動メカニズムあるいは完新世全体の気温変動の原因がすべて特定できているわけではありません。

ここでは、未解明な問題の一端を示すと同時に、最近の新たな知見について紹介することにします。

#### (1) 太陽放射の変動と気温変動

太陽活動の活性度の指標である放射照度や  $^{14}\text{C}$  の変動と気温変動の間に強い相関関係があることは明らかです。氷河期における気温が主に太陽活動に同期して変動していることは間違いないでしょう。

しかし、単純に太陽放射照度の変動が気温変動を引き起こしているわけでもないようです。

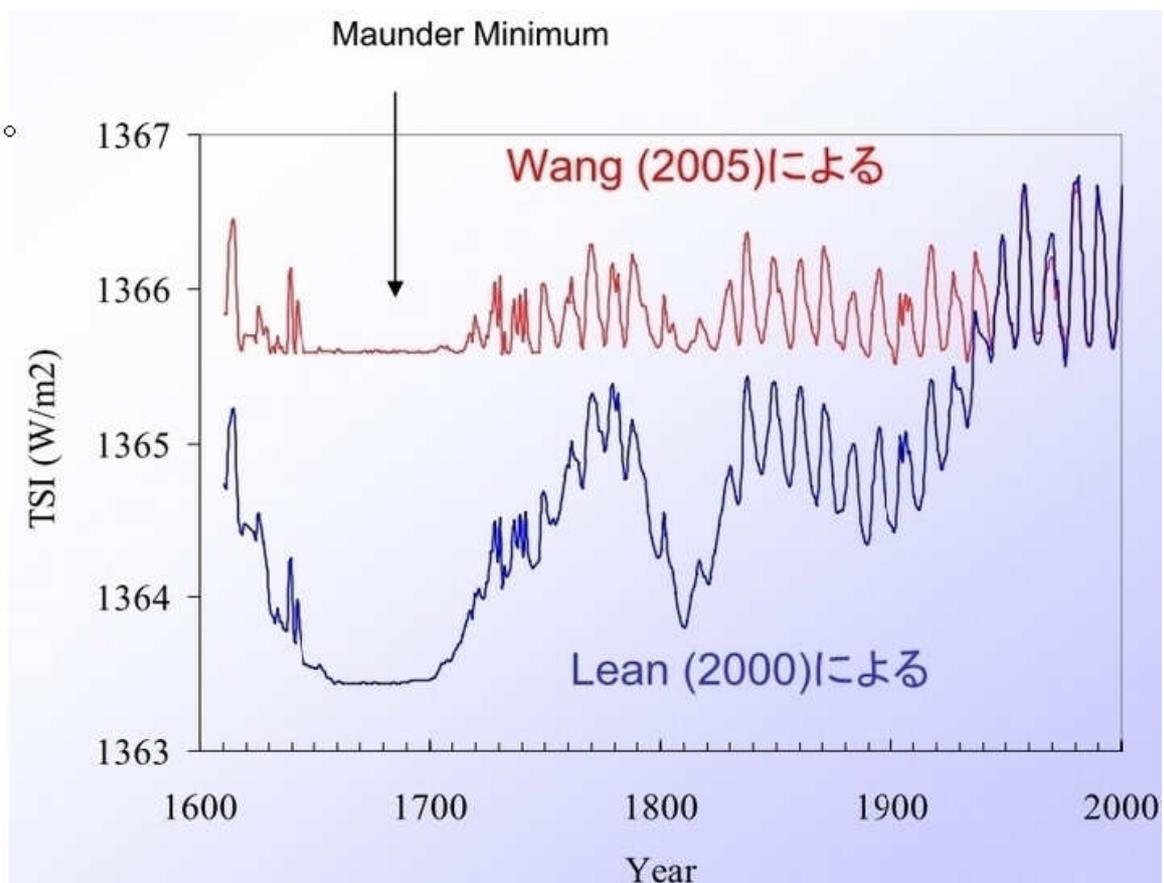


図 3-5 太陽黒点数から復元された太陽放射照度

前頁の図 3-5 は、太陽黒点数の変動とそれを基に復元した太陽放射照度の変動を示しています（出典：宮原/中世の温暖期と近世の小氷期における太陽活動と気候変動）。

復元方法によって差はあるものの、小氷期と現在の太陽放射照度の変動幅は 1~3 W/m<sup>2</sup> 程度とごくわずかです。

大きめに見積もって 3 W/m<sup>2</sup> 程度の変動があったとして小氷期と現在の太陽放射照度が 1363.5~1366.5 W/m<sup>2</sup> の間で変動したものとすると、地球の表面が受ける平均的な放射照度は 340.875~341.625 W/m<sup>2</sup> の間で変動します。

3-1 (1) で示した地球の表面環境の熱収支に基づいて地表面の放射平衡温度を計算すると次の通りです。

- 340.875W/m<sup>2</sup> の場合

$$\sqrt[4]{\frac{340.875 \times 1.13}{5.67 \times 10^{-8}}} = 287.09(K)$$

- 341.625W/m<sup>2</sup> の場合

$$\sqrt[4]{\frac{341.625 \times 1.13}{5.67 \times 10^{-8}}} = 287.25(K)$$

温度差は 0.16 (K) です。しかし、歴史的な記録から見ると、小氷期の低温期から現在までには少なくとも 1.0 (K) 以上の気温上昇があったと考えられます。

このように、太陽放射照度の変動だけではこの間の気温上昇について定量的な説明をすることが出来ません。

人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説では、短絡的に、観測されている気温上昇は太陽放射照度の変動だけでは説明できないので、人為的な CO<sub>2</sub> 放出による温室効果を考慮しなくてはならないと主張します。

しかし GISP2 による気温復元図から産業革命以前の完新世の気温変動については、人為的な CO<sub>2</sub> 放出がなかったにもかかわらず、振幅 3 (K) 程度の気温変動が起きています。

太陽放射照度の変動だけでは気温変動を説明できないからという理由だけで、気温変動とは全く異なる変動傾向を示す人為的な CO<sub>2</sub> 放出による温室効果を考慮する必要があるという主張に合理性はありません。

気温変動と太陽の活性度の間には高い相関が認められることから、太陽放射以外に太陽活動の活性度に伴って変動する気温変動を引き起こす要因があることを示唆していると考えるのが自然科学的に合理的な判断だと考えます。

## (2) 太陽磁場と気温変動（スペンスマルク効果）

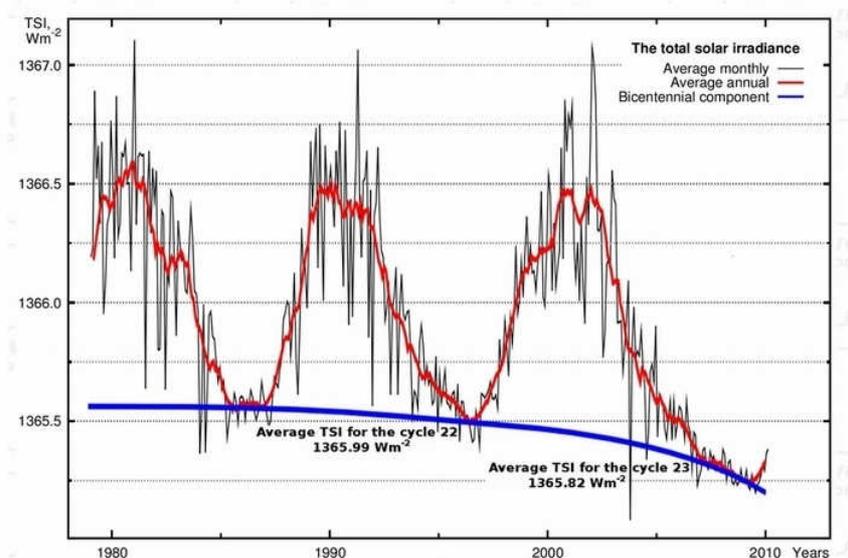
1-5 (2) で触れたように、太陽活動が活発な時には太陽風・太陽磁場が強くなり、地球大気に侵入する宇宙線量が小さくなります。

これは、太陽活動が活発な時期には炭素の同位体である <sup>14</sup>C の生成量が少なくなることに

反映されています。したがって、 $^{14}\text{C}$  の生成量と太陽活動の活性度は負の相関関係にあります。

デンマーク国立宇宙センター太陽・気候研究センターの所長であった H. Svensmark (スベンスマルク) は大気に侵入する宇宙線量と低層雲の発生について調べました。その結果、両者の間には強い正の相関関係があることを発見しました。

図 3-6 に太陽放射照度と、侵入宇宙線量と低層雲量について示します。太陽放射照度と侵入宇宙線束は負の相関を示し、宇宙線束と低高度の雲量は見事に同期していることが分かります。



### 低高度の雲量と宇宙線束の相関性

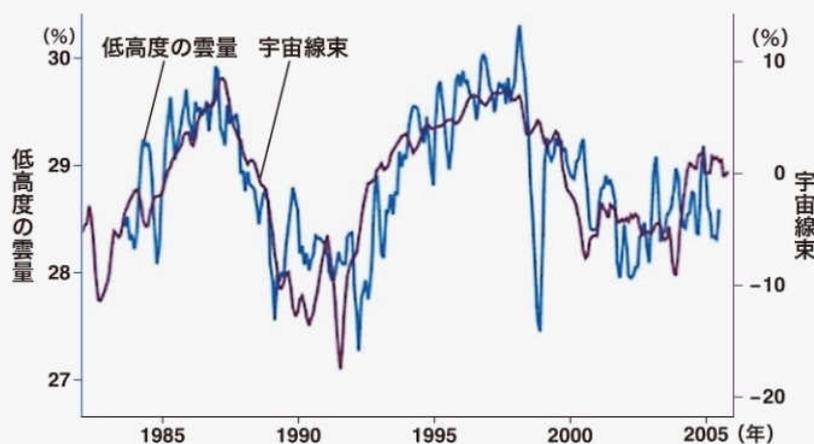


図4：低高度の雲量と宇宙線束の相関性

(出所：スベンスマルク「気候変動における太陽の役割」を参考に編集部作成)

図 3-6 逆相関を示す太陽放射と低層雲量

中学校理科でウィルソンの霧箱の実験を経験した方は多いと思います。過飽和水蒸気に満たされた霧箱に荷電粒子が侵入すると水蒸気が凝結して見えるのです。

大気に荷電粒子である宇宙線が侵入すると、大気を構成する気体分子をイオン化し、極性分子である水蒸気がイオン化された気体分子に凝集して水滴になるのです。

図から、この期間、太陽放射照度は概ね  $1365.5\sim 1366.5\text{W/m}^2$  の間で変動しています。これに対して、低層雲量は  $28\sim 30\%$  の間で変動しています。ここでは、太陽放射照度  $1\text{W/m}^2$  の変動に対して雲量が  $-2\%$  変動するものとします。

雲には「日傘効果」、つまり太陽放射を反射して地表面に届かなくする効果があります。全天が快晴の場合には、地球表面は平均  $1366/4=341.5\text{W/m}^2$  の太陽放射を受けています。

雲が完全に太陽放射を遮蔽すると仮定すれば雲量が  $1\%$  増える毎に  $341.5\times 0.01=3.415\text{W/m}^2$  だけ地表面に到達する放射が減少することになります。しかし真空に近い宇宙空間とは異なり、大気に侵入した太陽光は散乱されているため、雲による太陽光の遮蔽効果はそこまで大きくはないと考えられます。ここでは雲による太陽光に対して有効な遮蔽効果を  $50\%$  程度とします。

つまり、太陽放射照度が  $1\text{W/m}^2$  変動すると、雲量の変動によって地表面に到達する太陽放射が

$$3.415 \quad \text{W} / \text{m}^2 \times 2 \times 50\% = 3.415 \quad \text{W} / \text{m}^2$$

だけ変動することになります。雲による遮蔽効果を  $50\%$  としても太陽放射照度の変動による地球表面に到達する太陽放射の変動よりも、雲量の変動による日傘効果の減少による地球表面に到達する太陽放射の変動の方がはるかに大きいのです。

**Maunder** 極小期の気温の計算において、3-1 (1) に示した現在の平均的な熱収支図を少し訂正します。

**Maunder** 極小期から現在までに太陽放射照度は  $3\text{W/m}^2$  程度上昇しているため、雲量は  $6\%$  程度増えていることになります。そこで、太陽放射に対する反射を  $30$  から  $6\times 50\%=3$  増やし  $33$  に、地表面の受け取る太陽放射を  $47$  から  $3$  減らして  $44$  にします。これに対応して地球表面からの熱放射を  $113$  から  $110$  に減少させます。

$$\sqrt[4]{\frac{340.875\times 1.10}{5.67\times 10^{-8}}} = 285.17(\text{K})$$

したがって、前回の記事を参考にすると現在は **Maunder** 極小期から  $2.08\text{K}$  の気温上昇ということになります。

ここでは第一次近似として、雲量の変化を太陽放射照度の変動と線形関係にあると仮定しましたが、ある程度妥当な結果が得られることが分かりました。

太陽放射の変動だけでは気温変動を説明できないから人為的な  $\text{CO}_2$  放出による温室効果を考慮する必要があるという主張はもはや必要ないでしょう。

気温と太陽活動の間にはまだまだ他にも考慮すべき要素があるかもしれません。今後の研究に期待したいと思います。



### 3-3 その他の気温変動要因

これまで、氷河期の気温変動に影響を与える主要な現象について紹介してきました。

しかし、地球の気象ないし気温を決定するのは、地球環境のマイクロからマクロに至る無機的な現象だけでなく生命を含むあらゆる現象の総体であり、更には太陽系を中心とした天体からの影響まで含めなくては正しく理解することは出来ません。

現状では主要だと考えられている幾つかの現象についてある程度の情報を持っているにすぎません。残念ながら、こうした気象現象の様に輻輳した幾多の要因によって変化する現象の全体像については、将来的にも、すべての関係性を定量的に把握することは不可能でしょう。

ここではこれまで紹介してきた以外の気温の変動要因だと考えられる幾つかを紹介することにします。ただしその現象が気象現象や気温に対してどのように影響するのかは明確ではないことをご承知ください。

#### (1) 月の公転軌道と気温変動

月は地球に最も近い天体です。地球の衛星である月は地球に対して異常に大きい衛星であることで特殊です。その結果、月によって地球の受ける影響は非常に大きいことは明らかです。

既に紹介した GISP2 の気温変動の分析を行ったノルウェーのオスロ大学の O. Humlum 等は、完新世の直近の 4000 年間ほどの期間の気温変動、約 1000 年毎に明確な気温極大期を生じることを含む気温変動が月の公転軌道要素の変動に同期していることを同定したと報告しています。

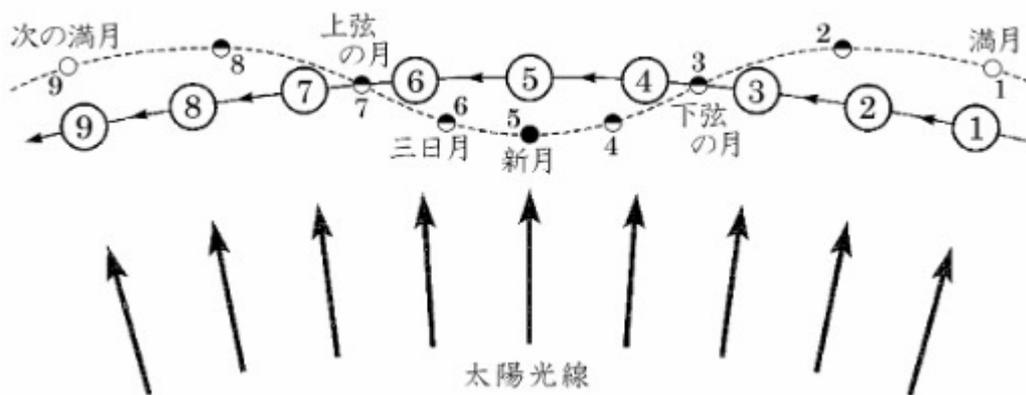


図 3-7 地球を巡る月の運動

月は地球を楕円軌道で周回しながら、地球-月系は太陽の周りを公転しています。

地球の太陽周回の公転面に対して、月の地球を周回する公転面は少しずれています。

月の太陽に対する公転軌道は、地球の太陽に対する公転軌道を蛇行するように交差しながら地球を追い抜いたり追い抜かれたりしながら複雑に変化しています。

地球-月系の最も明確な物理現象は地球の海水の潮汐運動として表れています。これは地球-月系の万有引力による一つの現象です。おそらく、潮汐運動だけでなく、海洋の大循環

構造にも大きな影響を与えていることが推測されます。

月の地球を巡る公転運動の軌道要素の変動は海水の運動に限らず様々な影響を与えていることが予測されます。

O. Humlum 等は地球の直近の数千年のタイムスパンの気温変動の周期性の分析を研究目的としているために、月の公転軌道の変動が地球の気温変動周期と同期していることを同定しましたが、なぜ気温変動が起こるのかを物理的に解明していません。これについては今後の研究によって明らかになるのかもしれませんが。

## (2) 海洋と気温変動

地球表面の7割程度を占める海洋の気温に対する影響がとても大きいことは自明です。しかし、海洋の状態を正しく把握することはとても困難です。

地球の気温は、例えば「2-2(4) 気温と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化率」で紹介した図に示すように、太陽活動の10年程度の活性度の短期的な変動周期とは異なる3~4年程度の不規則な変動を示しています。この変動は南米のペルー沖の海面水温の変動であるエルニーニョ現象あるいはラニーニャ現象の発現に同期しています。

海水の比熱は大気の比熱に比較して圧倒的に大きいため、海水による熱輸送は地表面環境の気温に対して大きな影響を与えることは容易に推測できます。しかし海洋の熱物理学的な性質の全体像は明らかになっていません。

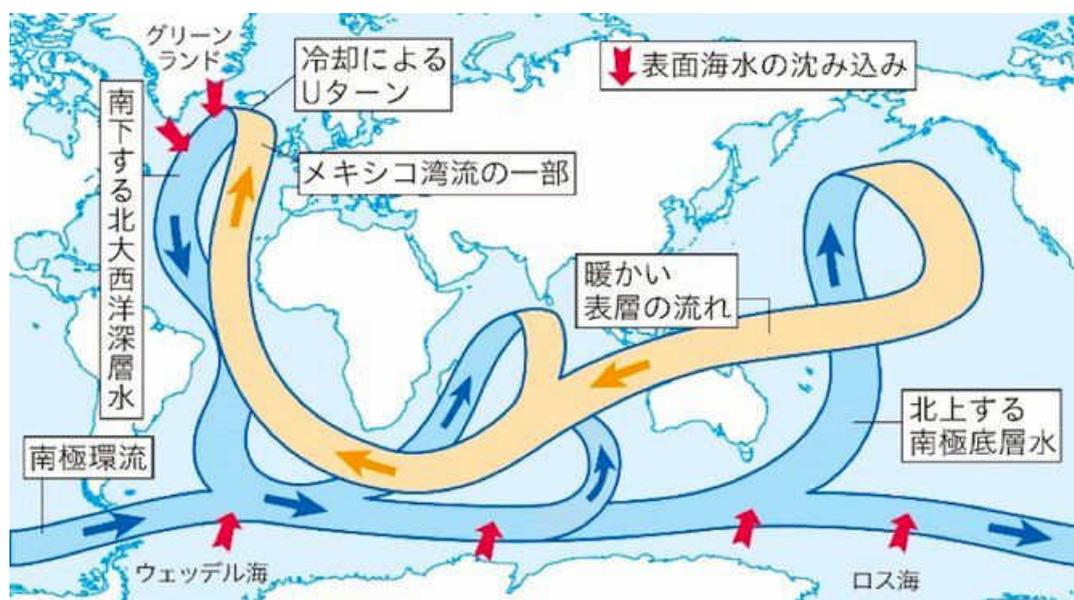


図 3-8 海水の大循環構造

海水の流れには表層数百メートルまでの循環運動である海流があります。これは風成循環と呼ばれ、海水の地球の惑星運動に起因する運動と海洋に接する大気の流れから受ける摩擦力によって説明されています。

更に海洋には表層から数千メートルの深海にまで及ぶ海水の大循環構造が存在します。これは熱塩循環と呼ばれ、海水温、塩分や栄養塩類の濃度による海水の比重差によって駆動されていると考えられています。

熱塩循環は海洋表層の風成循環・海流と結合して熱や塩分、養分の循環構造を作っています。

海水の表層と深層を含めた循環構造は複雑であり、その全体像はほとんど分かっていないと言ってよいでしょう。

海流は、第一に天体としての地球の加速度運動によって駆動されています。地球は月と力を及ぼし合いながら太陽の周囲を公転しています。したがって、海水の大循環構造は、太陽・月の引力、地球や月の軌道の摂動による複雑に変化する重力場の中で絶えず変動しています。

また海洋は、気象現象を直接支配している圧縮性混合気体である大気の循環とその境界面で物質・熱・力学的エネルギーの交換を含めて影響を及ぼし合って変化します。

さらに、海洋の熱塩循環は海洋の生態系＝生命現象の影響を受けています。

海水の運動は循環を持つ流れのある系＝非平衡系であり、しかも生態系の影響を内包しているため、海水の循環構造は、変動幅が非常に大きいと考えられます。したがって、海洋と気温変動との物理的な関係はほとんど未解明と言ってもよいかもしれません。

このように、気象現象に対して大きな影響を与える海水の循環による熱輸送は生命現象を含み非常に変動幅が大きな非平衡現象であるため、元沖縄高専教授である中本正一郎さんは「長期的な気候変動予測は理論的に不可能である」と主張しています。

この件については中本さんの最新英文レポート「なぜ生物圏は地球の気候と相互作用するのか？双方向の相互作用はどのように働くのか？(Why biosphere interact with earth climate, and how does the two-way interactions work?)」にまとめられていますので、近いうちに紹介できるかもしれません。

### 3-4 結論 ～長期の気象予測は不可能

本章では、気温変動あるいは気象現象に影響を与える幾つかの要素について簡単に触れてきました。

実際には、地球上で起こるあらゆる現象が気象現象、その一部である気温変動に影響を及ぼします。

地球上で起こる現象は地球という閉じた空間で完結するものではなく、太陽や月を含めた太陽系の天体からの影響、更には外宇宙からの影響をも受けています。

したがって、極論すれば宇宙で起こる生命現象を含むあらゆる現象を解明した上で、輻射する相互の関係性まで解明しない限り、気象現象を長期間にわたって予測することは不可能です。現実的には将来的にもこれは不可能であり、まして数値化してシミュレーションを行うことなど不可能なのです。

現在、人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説の「証明」と言われている幼稚で単純な数値モデルで気象現象を模倣し、将来の変動を予測することは不可能です。

現在の気候変動シミュレーションでは、産業革命以降の気温の主要な変動を CO<sub>2</sub> 濃度の上昇によって説明できることを前提に調整されています。

温暖化が騒がれ始めた 1980 年代から 2000 年頃にかけては、CO<sub>2</sub> 濃度も世界平均気温偏差も上昇傾向を示しました。人為的 CO<sub>2</sub> 地球温暖化説ではこの僅か数十年間の気温と大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の関係を「近視眼」的にとらえて「大気中の CO<sub>2</sub> 濃度上昇によって気温が上昇する」と主張したものです。しかしこれが誤りであることはほんの少し時間を遡れば明らかです。

次頁の図 3-11 下段の図に示すように、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は産業革命以降、というよりも小氷期が終わって以降、単調な上昇傾向を示すと考えられています。

しかし、実際の気温は図 3-11 中段の図に示すように、60 年程度の周期性を持つ変動を示しています。この気温変動と太陽の放射照度の変動傾向は見事に同期していることが分かります。

したがって、産業革命以降の気温変動の主要な変動要因は太陽活動の変動による放射照度などの物理現象の影響によるものであると考えられます。

大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の影響が全くないとは言いません。しかし、図 3-11 は、その影響は気温変動に現れるほど大きくはないことを示しています。

恐らく太陽放射照度の変動だけでは完新世の更に長いタイムスパンの気温変動を説明できないでしょう。図 3-11 上段の図に示す GISP2 の気温復元図に見られるここ 4000 年間ほど続いている 1000 年周期の気温極大期の発現は更に別の現象の影響を示すものと考えられます。これについてノルウェーのオスロ大学の O. Humlum 等は月の軌道の影響を受けていることを同定したとしていますが、その具体的な仕組みについてはまだ明らかになっていません。

我々が観測しうるデータのタイムスパンはさほど長くありません。気象観測データが系統的に存在するのはわずか 100 年余りにすぎないのです。その観測されている現象についても、未だ謎ばかりです。

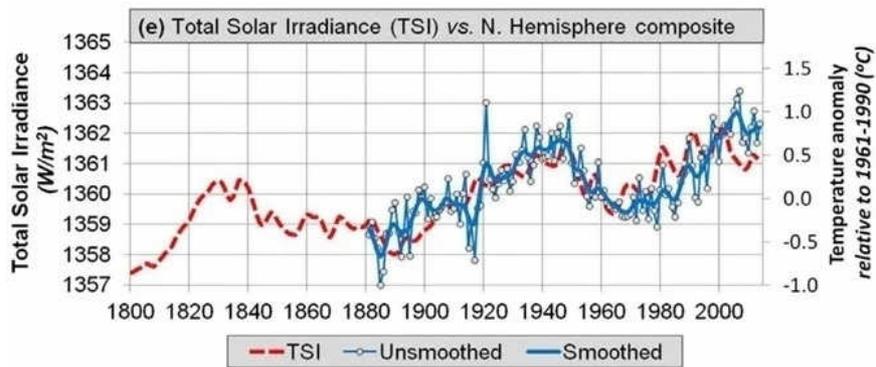


Figure 2. Soon, et al.'s Northern Hemisphere rural-only temperature record (in blue) versus TSI (in red).  
Source: (Soon, Connolly, & Connolly, 2015).

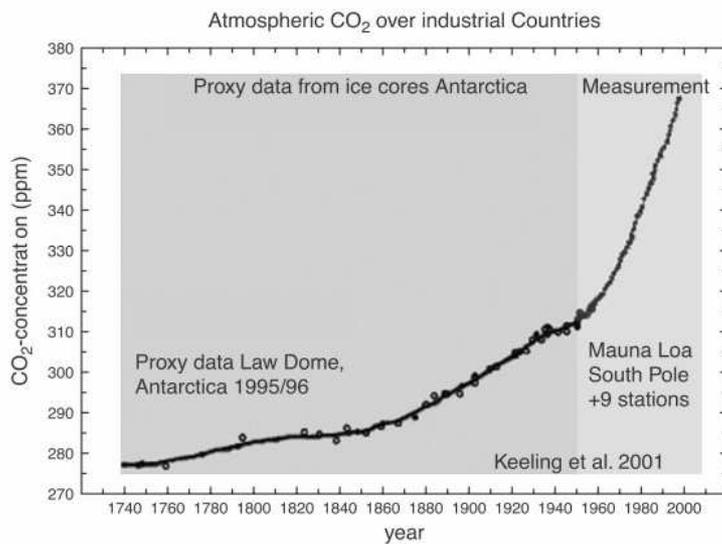


図 3-11 気温変動と CO<sub>2</sub> 濃度変動

このように、気象現象という現象はあまりにも関連する現象が多く、時間スケール・空間スケールの多様性から、閉じた理論体系として扱うことは困難であり、コンピューターシミュレーションにはなじまない現象です。

蛇足ですが、気象現象の数値モデルの基礎となっている流体の物理学も完成されたものではありません。現実の流体の運動は散逸系の運動です。流体を構成する分子の運動は力学的な運動が熱エネルギーと密接にかかわり、しかも大気には相変化する水蒸気が含まれています。これを適切に表現できる理論すら現状では存在しないのです。おそらく将来的にも不可能でしょう。

私たちが利用できるとすれば、ごく短期の、数日の天気予報程度に限られると理解すべきです。