

第6章 古気候

概要

過去の温室効果ガス濃度と気候の間にはどのような関係があるか

- ・ 大気中でよく混合した三種類の温室効果ガスである、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素を合わせた放射強制力の、過去一世紀間にわたっての一貫した増加率は、少なくとも過去1万6000年に前例のないものである*可能性が非常に高い*。過去1万年間の観測結果によれば、工業化以前の温室効果ガスの大気中濃度の変動は、工業化時代の温室効果ガスの増加に比べると小さく、その大部分が自然起源のものであった*可能性が高い*。
- ・ 現在の二酸化炭素（379 ppm）とメタン（1774 ppb）の大気中濃度が、過去65万年間の自然変動幅をはるかに超えるものである*可能性が非常に高い*。氷床コアデータによれば、この間に二酸化炭素は180~300 ppm、メタンは320~790 ppbの間でそれぞれ変動していた。同期間の南極の気温と二酸化炭素濃度の変動は同期しており、気候と炭素循環に密接な関係があることを示している。
- ・ 氷期-間氷期間の二酸化炭素の変動が気候変動を強く増幅した*可能性は非常に高い*が、二酸化炭素変動が氷期の終わりを引き起こした*可能性は低い*。過去の氷期終焉時において、南極の気温は大気中二酸化炭素より数世紀早く上がりはじめた。
- ・ 大気中二酸化炭素濃度が現在より高かった過去の時代には、現在より高温だった*可能性が高い*。このことは、数百万年続いた気候状態（例えば約500万年前から300万年前の鮮新世）や数十万年続いた温暖期（例えば5500万年前の暁新世-始新世温暖期）のどちらにもあてはまる。どちらの場合にも、低緯度に比べて北半球高緯度において昇温が強く増幅された*可能性が高い*。

氷期-間氷期気候変動の重要性は何か？

- ・ 気候モデルによれば、最終氷期最盛期（約2万1000年前）には、温室効果ガス強制力と氷床の状態の変化により、現在より3~5°C低温だった。大気中のちりと植生変化の効果を入れるとさらに1~2°Cの世界的な寒冷化をもたらされるが、これらの効果についての科学的理解は大変低い。最終氷期最盛期以降の4~7°Cの地球全体の温暖化は、20世紀の温暖化より10倍ゆっくと起った*可能性が非常に高い*。

- 海洋の代替データによれば、最終氷期最盛期に、熱帯では海面水温が低下（平均で2～3℃）し、高緯度海域ではより大きな降温と海氷の拡大が起こった。気候モデルは、地球軌道要素、温室効果ガスと地表面変化への応答として、これら緯度方向の海洋の変化の大きさを再現できることから、過去の気候状態を決める主な過程の多くが適切に表現されていることが分かる。
- 最終氷期最盛期の陸上データは、熱帯の（5℃にも及ぶ）顕著な降温と、高緯度でのより大きな降温を示している。気候モデルがこれらの応答を再現する能力は一様でない。
- 来る数世紀間の世界的な気温が、自然的な軌道要素起源の降温に顕著な影響を受けることがないことはほぼ確実である。少なくとも今後3万年に地球が次の氷期に入る可能性は非常に低い。
- 最終氷期の間、急激な地域的温暖化（グリーンランドでは数十年間で16℃に達した可能性が高い）と寒冷化が北大西洋域で何度となく起った。これらは熱帯の降雨分布の大規模な移動のような、世界的な規模での連関を伴っていた可能性が高い。これらの出来事が世界平均地上気温の大きな変化に伴っていた可能性は低い、代わりに大西洋の循環の変化に伴う、気候システム内の熱の再配分に関連していた可能性が高い。
- 約12万5000年前の最終間氷期の世界平均海面水位は、20世紀より4～6m高かった可能性が高い。古気候証拠と一致して、気候モデルによるシミュレーションでは、最終間氷期における5℃にのぼる北極夏季気温の昇温が再現されている。昇温はユーラシアとグリーンランド北部で最大だったと推定され、グリーンランドの最高部は現在に比べて2～5℃高温だったと再現されている。これは、南グリーンランド氷床と他の北極氷原の大規模な後退が、最大で2～4mの、最終間氷期の海面水位上昇に寄与し、残りの大部分が南極氷床によるとの氷床モデルによる結果と整合している。

間氷期の気候研究から何が分かるか？

- 時間解像度が百年規模の古気候記録をみると、工業化以前の過去1万年の間に、地域的で一過性の温暖期があったことが分かるが、これらのよく知られた温暖期が世界的に同時に起っていた可能性は低い。同様に、時間解像度が十年規模の、間氷期の古気候記録は、地域的で周期性のある気候変動が起こったことを支持しているが、これらの地域的なシグナルが世界的に同時に発生していた可能性は低く、また、過去100年間の地球全体の温暖化の大部分を説明できる可能性も低い。

- ・ 北半球の幾つかの山岳域の氷河は 1 万 1000~5000 年前にかけての軌道要素起源の地域的昇温に応答して後退し、5000 年前以前には、20 世紀末より小さかった（または存在すらしていなかった）。北半球の過去数千年の夏季太陽入射量の減少は氷河の成長に有利なはずであるので、現在のほぼ世界的な山岳氷河の後退の原因を同じ自然起源に求めることはできない。
- ・ 大循環モデルを用いると、完新世中期（約 6000 年前）について、気候変化に関する観測結果の、確かで定性的な大規模な特徴の多くを再現することができる。そのような特徴としては、世界平均気温の変化をほとんど伴わない（0.4℃以下）中緯度の昇温や、軌道要素強制力についての理解と整合するモンスーンの変化がある。記録がよく整備された地域をみると、モデルの結果は水文学的变化を過小評価する傾向にある。結合気候モデルは大気のみモデルより一般に成績が良く、このことは海洋と陸面のフィードバックに気候変化を増幅させる役割があることを示している。
- ・ 気候・植生モデルを用いて、温暖化に伴う、北方樹木限界線の過去の北上が再現されている。古気候結果はまた、これら樹木限界線の移動が顕著な正の気候フィードバックをもたらした可能性が高いことを示している。このようなモデルはまた、気候境界条件や強制力（例えば氷床、軌道変化）の大きな変化に伴う、植生の構造や陸上炭素貯蔵の変化をも再現することができる。
- ・ 古気候の観測によれば、過去 1 万年の間に、熱帯低気圧、洪水、十年規模の干ばつやアフリカ-アジア夏季モンスーン強度の地域的頻度に、十年から百年規模の急激な変化が起った可能性が非常に高い。しかしながら、これらの急激な変化の背後にあるメカニズムはよく分かっておらず、最新の気候モデルを使った徹底的な調査も行われていない。

20 世紀の気候変化は過去 2,000 年の気候とどう比較されるか？

- ・ 二酸化炭素の平均増加率及び二酸化炭素、メタンと一酸化二窒素が合わさった放射強制力の平均的増加率は、1960~1999 年にかけては、工業化以前の過去 2000 年間の内のどの 40 年間よりも少なくとも 5 倍速かった可能性が非常に高い。
- ・ グリーンランドと北半球中緯度の氷床コアデータは、工業化以前と比べて工業化以降には硫酸塩濃度が急激に増加した可能性が非常に高いことを示している。
- ・ 第 3 次評価報告書以降の研究の中には、過去 1000 年間における数百年スケールの北半球気温変動度が、第 3 次評価報告書の結果より大きいものがあり、このことは、

代替データの選択とこれらのデータを処理して過去の気温にスケーリングする統計手法によって結果が変わることを示している。新しい研究は主に低温の期間（主として12～14世紀、17世紀及び19世紀）の存在を示しており、新しい復元データのうち一つだけが若干高温の期間（11世紀、ただし第3次評価報告書で示された不確実性の範囲に収まっている）を示唆している。

- 第3次評価報告書は「過去1000年に比べての、20世紀後半の異例な高温」を指摘した。その後明らかになった事実はこの結論を強化している。20世紀後半の北半球平均気温が過去500年間の内のどの50年間よりも高かった可能性が非常に高い。この50年の期間が過去1300年間に北半球で最も高温な期間で、この高温の領域が過去1300年間のどの50年間よりも大きく広がっている可能性も高い。これらの結論は、初期にはデータ範囲が乏しいために、中緯度の夏季の陸上で、またより最近の期間において、最も確かである。
- 過去1000年における、工業化以前の二酸化炭素とメタン濃度の変動が小さかったことは、代替データから復元された千年規模の北半球気温と整合している；復元データで示されたよりも気候変動が大きければ、濃度変化もより大きい可能性が高い。工業化以前の温室効果ガスの変動が小さいことも、世界平均気温の十年から百年規模の変動が限定的だった間接的な証拠になる。
- 古気候モデルによるシミュレーション結果は、過去1000年の北半球気温再現データとほぼ整合している。1950年以降の地上気温の上昇は、モデル強制力に人為起源の温室効果ガスを含まないと再現できない可能性が非常に高く、この温暖化が20世紀以前の寒冷期からの単なる回復である可能性は非常に低い。
- 南半球と熱帯の過去1000年の気候変動の知識は、古気候記録の密度が低いため、かなり限られている。
- 過去1000年にわたり復元された気候データによれば、エルニーニョ南方振動現象に関連した空間的気候テレコネクションは、20世紀の測器記録で示されるものより変化に富んでいたことが、高い信頼度で示される。
- 北部及び東部アフリカと南北アメリカの古気候記録によれば、数十年以上続く干ばつが繰り返し起こったことが、これらの地域における過去2000年の特徴であることが高い信頼度で示される。

古気候記録により、フィードバック、生物地球化学過程と生物地球物理過程について明らかになることは何か？

- ・ 広く受け入れられている軌道理論によれば、軌道強制力への応答として氷期-間氷期サイクルが起ったことが示唆される。気候システムが大きく応答するという事は、この強制力に強い正の強化が働くことを意味している。主たる要素である温室効果ガス濃度の変化と氷床の成長・縮小に加えて、海洋循環と海水の変化、生物物理的フィードバック、エアロゾル（ちり）の量もまた、この強化に影響した可能性が非常に高い。
- ・ 最終氷期における、個々の南極昇温イベントに伴う、大気中二酸化炭素の千年規模の変化が 25 ppm 未満であったことはほぼ確実である。このことは、ともに起こった北大西洋深層水生成や南大洋での大規模な風成鉄の沈殿の変化が二酸化炭素に及ぼした影響が限定的だったことを示唆している。
- ・ 海洋炭素循環過程が氷期-間氷期間の二酸化炭素変動の主原因だった可能性が非常に高い。個々の海洋過程の定量化は困難な問題として残っている。
- ・ 古環境データによれば、地域的な植生の構成と構造は気候変化に敏感である可能性が非常に高く、ときには数十年以内に気候変化に応答し得る。

よくある質問と回答

FAQ6.1： 氷河期など、工業化以前の重要な気候変化の原因は何か？

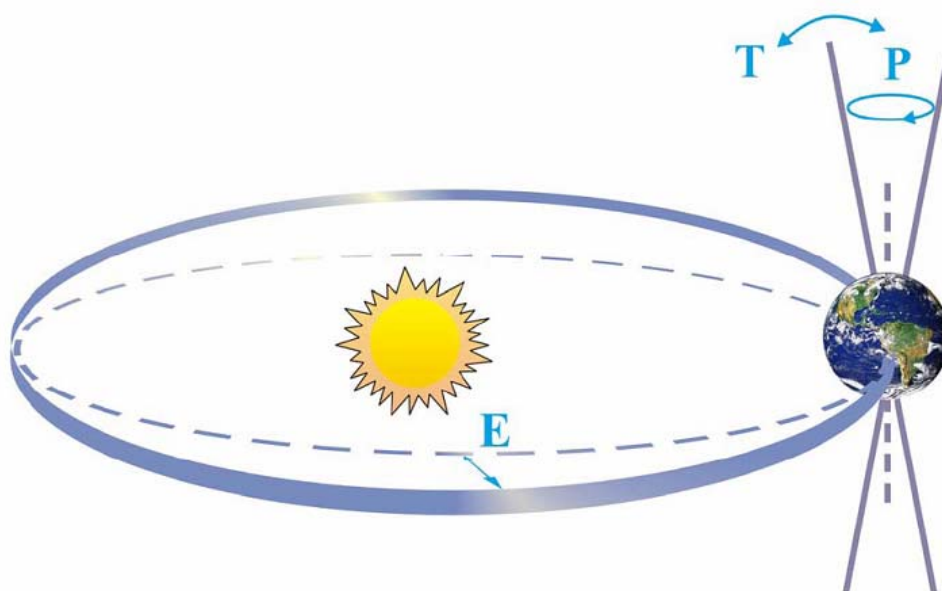
地球上の気候は、人間活動が役割を演じるよりずっと以前を含むあらゆる時間スケールで変化してきた。これらの気候変化の原因とメカニズムの理解は大きく進展してきた。地球の放射収支の変化が過去の気候変化の主たる駆動源であるが、そのような変化の原因はさまざまである。それぞれのケース-それが氷河期や恐竜のころの温暖期や過去千年期の変動であれ-について、固有の原因が個々に特定されねばならない。多くの場合において、これは今では十分な信頼性でなされ、多くの過去の気候変化が定量的モデルで再現できる。

世界の気候は地球の放射収支によって決まる (FAQ 1.1 参照)。地球の放射収支が変化し、それゆえに気候変化を引き起こす三つの基本的な過程がある：(1) 入射する太陽放射の変化 (例えば地球軌道要素の変化や太陽自身の変化)、(2) 太陽放射が反射される割合の変化 (この割合はアルベドと呼ばれる-これは雲量、エアロゾルと呼ばれる微粒子や地表面状態などで変化する)、(3) 宇宙空間へ戻る長波エネルギーの変化 (例えば温室効果ガス濃度の変化による)。さらに、局所的な気候は、風や海流による熱の移動のあり方にも依存

する。これらすべての要素が過去の気候変化で役割を演じてきた。

過去のほぼ 300 万年間に、規則的な周期で消長のあった氷河期から始めると、これらの周期が太陽の周りを回る地球の軌道の規則的な変動、いわゆるミランコビッチサイクルに関係していることを示す強い証拠がある (FAQ6.1 図 1)。これらの周期的な変化により、季節ごとに各緯度で受け取る太陽放射量に変化し (ただし地球全体の年平均値にはほとんど影響を及ぼさない)、その量は天文学的正確さで計算できる。このような変化により、氷期の初めと終わりがどの程度精確に決まったかについては依然議論があるが、多くの研究によれば、北半球の大陸の夏季の日射量が決定的であると示唆されている: もしこの日射量があるしきい値を下回ると、前年の冬の雪が夏に融けきらず、雪が積もるにつれ氷床が成長し始める。気候モデルによる再現実験は、氷河期がまさにこのように始まり得ることを確認しており、また簡単な概念モデルは、軌道要素変化に伴う、過去の氷河形成開始を「予測」することに成功している。過去の氷河期を開始させたと同様の、北半球夏季太陽入射量の次の大きな減少は 3 万年後に始まるはずである。

主要原因ではないものの、大気中二酸化炭素も氷河期において重要な役割を果たしている。南極氷床コアデータによれば、二酸化炭素濃度は、寒冷な氷期には低く (~190 ppm)、温暖な間氷期には高い (~280 ppm); 大気中二酸化炭素は南極の気温変化に数百年の遅れで



FAQ6.1 図 1 氷期サイクルを駆動する地球の軌道変化 (ミランコビッチサイクル) の模式図。” T” は地軸の傾き (または傾斜角)、“ E” は軌道離心率の変化 (楕円の短軸の変化による)、“ P” は歳差運動、すなわち軌道上のある時点での地軸の方向の変化。出典 : Rahmstorf and Schell Inhuber (2006)

追隨している。氷期の始まりと終わりの気候変化には数千年かかるので、これらの変化の多くは正の二酸化炭素フィードバックに影響されている；すなわち、ミランコビッチサイクルによる初期の小さな寒冷化が、次に二酸化炭素濃度が下がることで増幅される。氷河期の気候のモデルシミュレーション（6.4.1 節の議論参照）では、二酸化炭素の役割が考慮されているときにのみ現実的な結果が得られる。

北大西洋周辺の記録で特に明らかなように、20 以上の急激で劇的な気候シフトが最終氷期に起こった（6.4 節参照）。これらは、おそらく世界平均気温の大きな変化を伴わない点で、氷期-間氷期サイクルとは違う：グリーンランドと南極の変化は同期しておらず、南大西洋と北大西洋では変化は逆向きである。このことは、これらのシフトをもたらすには、地球全体の放射収支の大きな変化は必要とせず、気候システム内の熱の再配分で十分なのであろうことを示している。海洋循環と熱輸送の変化でこれらの急激な出来事の特徴の多くを説明できるという強い証拠がある；堆積物データとモデルによる再現実験によれば、これらの変化の幾つかは、当時の大西洋をとりまく氷床の不安定性とそれに伴う海洋への淡水供給がきっかけになって引き起こされた。

気候史上、ずっと温暖な時期もあったーグリーンランドと南極が氷で覆われている現在とは異なり、地球は、過去 5 億年のほとんどの期間、おそらく氷床がまったくなかった（地質学者は氷が岩に残す痕跡から見分けることができる）。南極氷床コアで分かる範囲を超えた 100 万年以上さかのぼる温室効果ガス量のデータは依然としてかなり不確かだが、地質標本の解析では、温暖で氷のない期間は、大気中二酸化炭素が高水準の期間と一致することが示唆される。百万年の時間規模では、造山活動は固体地球と海洋・大気間の二酸化炭素交換率に影響しており、二酸化炭素水準は造山活動により変化する。これらの古代の気候については BOX6.1 を参照のこと。

過去の気候変化の原因のもう一つの可能性は、太陽のエネルギー出力の変動である。最近数十年の観測は、太陽出力は 11 年周期でわずかに（約 0.1%）変動することを示している。太陽黒点の観測（17 世紀までさかのぼる）及び宇宙線で生成される同位体データは、より長期間の太陽活動の変化の証拠となる。データ相関法及びモデルによる再現実験は、太陽変動と火山活動が、工業化開始以前の過去 1000 年の気候変動の主要な理由である可能性が高いことを示している。

これらの例は過去のいろいろな気候変化には、それぞれ異なる原因があることを示している。自然の要素が過去の気候変化を引き起こしたという事実は、現在の気候変化が自然のものであることを意味するわけではない。山火事が従来自然の落雷で引き起こされてきた事実が、火事が不注意なキャンパーによっても引き起こされないことを意味しないこと

が類推となろう。FAQ 2.1 は最近の気候変化への貢献度を、人間の影響と自然の影響を比較した結果について答えている。

FAQ6.2：現在の気候変化は地球史におけるこれまでの変化と比べて特異か？

地球の歴史を通して、あらゆる時間スケールで気候は変化してきた。現在の気候変化には、特異なものもそうでないものもある。大気中の二酸化炭素濃度は、過去 50 万年以上で記録的に高くなっており、かつ異例の速さで高くなってきた。現在の世界平均気温は少なくとも過去 5 世紀の、おそらく過去 1000 年以上のどの時期よりも高い。もし温暖化が止まらずに続けば、その結果として本世紀中に起こる気候変化は地質学的にみても極端に特異となろう。最近の気候変化のもう一つの特異な点はその原因である；過去の気候変化は自然起源であった (FAQ 6.1 参照) が、過去 50 年の温暖化のほとんどは人間活動に原因が特定できる。

現在の気候変化を以前の自然要因の変化と比べるときには、三つの区別をする必要がある。第一に、どの変数を比較するのかを明確にする必要がある：温室効果ガス濃度なのか気温なのか (あるいは何か他の気候パラメータか)、その絶対値なのか変化率なのか？第二に、局所的変化と地球全体の変化を混同してはならない。局所的要因 (例えば海洋や大気の循環の変化) は、熱や水蒸気のある場所から別の場所への輸送を変化させることができ、局所的フィードバック (例えば海水フィードバック) も働くので、局所的変化はしばしば地球全体の変化よりもかなり大きくなる。対照的に、世界平均気温の大きい変化には (温室効果ガス濃度や太陽活動の変化のような) 地球全体の強制力を必要とする。第三に、時間スケールを区別する必要がある。数百万年以上にわたる気候変化は、百年規模の気候変化に比べてより大規模で、かつ原因 (例えば大陸移動) も異なっている。

気候変化について現在懸念が抱かれていることの主な理由は、大気中二酸化炭素 (及び他の温室効果ガス) 濃度の上昇であり、これは第四紀 (これまでの約 200 万年) において大いに異例である。南極氷床コアから、過去 65 万年間の二酸化炭素濃度については精度良く分かっている。この期間中、二酸化炭素濃度は、低いときには寒冷な氷期の 180 ppm から、高いときには温暖な間氷期の 300 ppm の間で変化してきた。二酸化炭素濃度は、過去百年にこの範囲を超えて急激に上昇し、今では 379 ppm になっている (第 2 章参照)。比較してみると、過去の氷河期の終わりの二酸化炭素濃度の約 80 ppm の上昇には 5,000 年以上の期間がかかっている。現在より高い値は数百万年以前に起こったのみである (FAQ 6.1 参照)。

気温は、地球上で同じ値はとらないため、(地球全体でよく混合した) 二酸化炭素より再

現の困難な変数であり、一つの記録（例えば氷床コア）の価値は限られている。局地的な気温の変動は、ほんの数十年の間でも数度にもなり、これは、過去 100 年で約 0.7℃の、世界平均温暖化シグナルより大きい。

地球全体の変化にとってより意味があるのは、局地的変動が平滑化されて変動が小さくなる、大規模な空間範囲（地球全体か半球）で平均した解析である。十分な測器記録はほんの 150 年しかさかのぼれない。より古い時代になると、樹木年輪、氷床コアなどからの代替データの編集物で 1000 年以上さかのぼれるが、時代をさかのぼるにつれ、空間的にカバーする範囲が限られてくる（6.5 節参照）。復元データ間には違いがあり、顕著な不確実性が残るが、公表された復元データはすべて、中世は温暖で、17, 18, 19 世紀には寒冷化し、その後急激に昇温したことを示している。中世における温暖の度合いは不確かだが、20 世紀半ばには同じ水準に達しその後上回った可能性がある。これらの結論は気候モデルを使った調査でも支持されている。今から 2000 年前以前の気温変動については、大規模スケールの平均値が得られるような系統的な編集は行われていないが、完新世（最近の 1 万 1600 年；6.4 節参照）を通じて、世界年平均気温が現在より高かったことを示す証拠はない。世界的に氷床が縮小し、海面水位が高い温暖な気候が約 300 万年前まで続いたことを示す強い証拠がある。従って、現在の温暖な状態は、過去千年間では異例だが、（自然要因により温室効果ガス濃度をゆっくりと変動させる）造山活動が関連してくる、より長い時間スケールでは異例なことではない（BOX6.1 参照）。

現在の温暖化の速度は別の問題である。これ以上に急激な世界的な気候変化が代替データに記録されているだろうか？過去 100 万年で最大の気温変化は氷期サイクルで、氷期と温暖な間氷期の間で世界平均気温は 4~7℃ 変化した（大陸氷床周辺など局所の変化はより大きい）。しかしデータによれば、氷期の終わりの地球全体の温暖化は約 5000 年かけて起こったゆっくりとしたプロセスであった（6.3 節参照）。従って、現在の世界平均気候変化率は、過去のいかなる変化よりもはるかに急激で異例なものである。しばしば議論される、氷期における急激な気候シフト（6.3 節参照）は、おそらく海洋熱輸送の変化によるもので、世界平均気温に影響を及ぼす可能性は低いので、反例にはならない。

氷床コアデータで明らかになる時期よりもさらに過去にさかのぼると、堆積物コアや他の記録の時間解像度では、現在の温暖化のように速い変化を分離できない。そのため、過去に大きな気候変化が起こったとしても、それらが現在の温暖化より速い速度で起こったことを示す証拠はない。もし今世紀中に約 5℃の温暖化（範囲の上限）との予測が現実になると、地球は最終氷期の終わりに起こったのと同等の世界平均昇温を経験することになる；将来起こり得るこの世界的な変化の速度に匹敵する世界平均気温上昇が、過去 5000 万年にあったことを示す証拠はない。