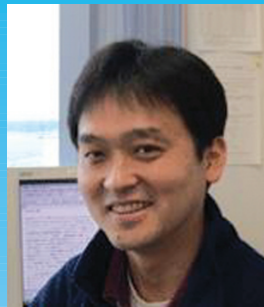


# チェンジング・ブルー 気候変動の謎に迫る

(2009年12月19日 第106回地球情報館公開セミナーより)



海洋・極限環境生物圏領域  
海洋環境・生物圏変遷過程研究  
プログラム プログラムディレ  
クター

## 大河内 直彦

おおこうち・なほひこ。1966年、京都市生まれ。東京大学大学院博士課程を修了後、京都大学生態学研究センター博士研究員、北海道大学低温科学研究所助手、米ウッズホール海洋研究所博士研究員などを経て現職。現在、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻および東京工業大学大学院総合理工学研究科化学環境学専攻の准教授も兼任。専門は生物地球化学。各種有機物を用いた地球環境の解明法の開発と応用。

私の専門は、生物プロセスの視点から地球環境を解明することですが、今回は10年以上かけて集めた資料をまとめた著書『チェンジング・ブルー—気候変動の謎に迫る—』（岩波書店）をもとに、堆積物や氷床に残された気候の歴史を読み解き、そこから明らかになる気候変動の仕組みについてお話します。過去数万年間に起きた大規模な気候変動は、現在の気候を考えるうえで多くの示唆を与えてくれます。そして、温暖化問題が顕在化する何十年も前から、気候の解明にさまざまな手法を使って挑んできた多くの研究者たちのことも知っていただければと思います。

## 地球は本当に温暖化しているのか？

気象庁によると、東京の平均気温はここ130年間で約3.5℃上昇しています。「昔はもっと寒かった」と思う方も多いと思いますが、一方で都市化の影響という側面があるのも事実です。しかし、都市化していないハワイのカウアイ島で1900年頃から観測されているデータでも気温は1℃以上上昇しています。北半球の平均気温をとると、やはり温暖化傾向は見えます。1900年から第二次世界大戦終戦あたりまでは徐々に温暖化し、途中若干の寒冷化を経て、1970年代半ば以降現在に至るまで再び上昇しています。

では、さらに昔はどうか。測器の記録、古文書や年輪、珊瑚の年輪などを使って過去1300年間の気温の変動を調

べたグラフを見ると、20世紀に入ると過去にはない急激な上昇があります(図1)。日本の歴史に照らしてみれば、弘法大師がいたころは現在よりも寒く、紫式部の時代は現在と比較的近い気温です。鎌倉・室町時代は現在よりも寒く、江戸時代になるとさらに寒くなり、福沢諭吉が登場する明治時代には再び暖かくなりはじめます。

## 海底の泥に隠された太古の気候

昔の気候を知る手段の一つに、海底に積もった堆積物を調べる方法があります。私の研究は主にこうした泥の分析で、大きな掘削船を使えば何kmもの堆積物を掘り出すことができます(図2)。そして、堆積物を調べると過去に起きた気候変動

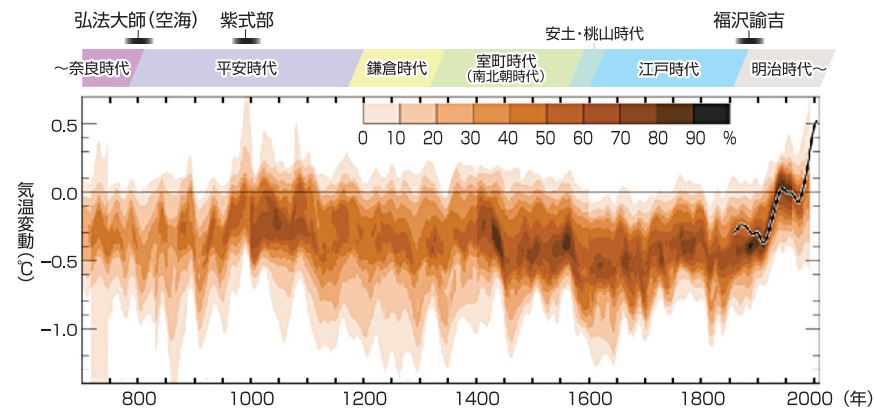


図1 過去1300年間にわたる北半球の平均気温変動

過去約1300年間にわたる北半球の平均気温の変化。1961～1990年の平均気温を基準に、多くの地質学的記録や古文書記録をもとに復元されたものを重ね合わせ、重なり度の合い(%)を示している。IPCC (2007) を改訂。

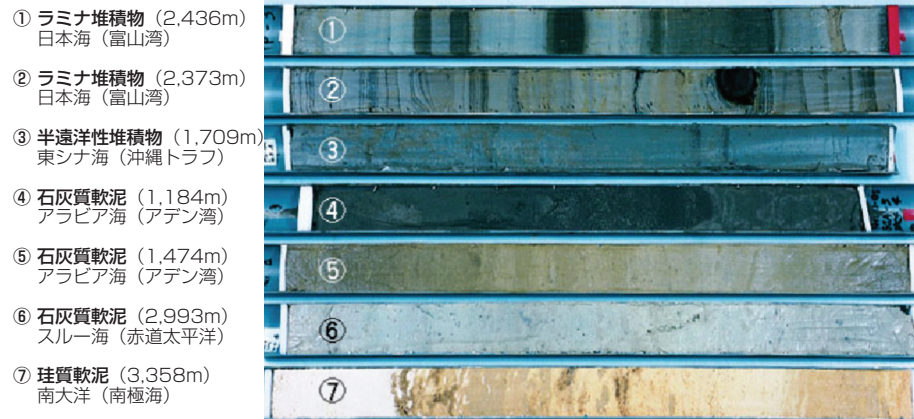


図2 さまざまな海底堆積物

世界各地でピストンコアによって採取された海底堆積物。地球上で形成されるさまざまな物質が混じり合っているため、多様な色をもっている。高知大学海洋コア総合研究センターの池原実准教授による。

の記録を読み解くことができるのです。堆積物には有孔虫というプランクトンの化石が入っています(図3)。これは炭酸カルシウムでできていて、このなかの酸素の安定同位体比を測定するとそれがつくられた時代の水温や氷床量を推定することができます。海水中にある酸素原子のほとんどは質量数16ですが、0.2%だけ質量18のものが混じっています。そして、質量18の酸素原子が炭酸カルシウムに含まれる割合は、それができたときの水の同位体比と水温によって微妙に変わるため、そこから過去の氷床量や水温を求めることができます。その結果、過去100万年の間、地球の気候は氷期と間氷期の間を行ったり来たりしてきたことが分かります。その変動の幅は平均気温で7℃くらいだということも分かってきました。

## 変動する海面

地質学者は陸上の記録も調べてきました。たとえば、平原に転がる「迷子石」と

呼ばれる巨石。これは、氷河が削り取って運んできた岩が、氷河が融けた際に置き去りにされたものです。U字型をした谷も氷河が谷底を削ってできた地形です(図4)。氷河が削り取ったがれきなどが堆積してできるモレーンと呼ばれる地形もあります。こうした証拠をまとめた結果、現在グリーンランドと南極にある氷床以外にも、カナダ一帯やイギリスからシベリアの北にかけて大きな氷床があったことが分かりました(図5)。

巨大な氷床は、もともと海水が蒸発して雨や雪として降ったものでできています。つまり、氷期にはその分だけ海水量が減ります。そして海水が減れば海面も下がります。珊瑚やマングローブのような浅瀬に生息する生物の化石を調べれば、こうした海面の変化を復元することができます。それによると、いまから約2万年前の氷期には140mぐらい海面が低かったのですが、その後氷床が融けて1万9000年前、1万4000年前、1万年前には急激に海面が上

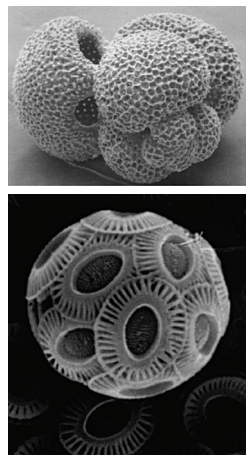


図3 有孔虫の化石  
有孔虫(上)は鉱物質の殻を持つ原生生物。円石藻(下)は炭酸カルシウムの殻を持つ植物性プランクトンの一種。いずれも1mm以下の小さなものだが、海洋の生態系や炭素循環を支える役割も果たしている。

図3上 <http://oceanworld.tamu.edu/> より

図3下 <http://www.mbari.org/> より

昇しました。最も速いときは、おそらく1年間に10cmぐらい海面が上がったでしょう。当時の人々は大変な迷惑を被ったと思いますが、この問題は現在の私たちも直面しつつある問題です。海面は、20世紀には年平均2mm、ここ10年では年平均3mmのスピードで上昇しています。このままいくと100年後には30cmも海面が上昇する計算で、ツバルのような海拔の低い国だけでなく、世界中の低地に住む人々にとって大きな問題になってくるでしょう。

## 地球の軌道要素が気候を変動させた

科学史をさかのぼると、17世紀のドイツの天文学者ヨハネス・ケプラーは、地球の公転軌道が楕円形であることを発見しました。日々太陽と地球の距離は変わっているのです。さらに、公転軌道の楕円の度合いも地球の外側を回る木星の重力の影響で年々少しずつですが変わります。このように、太陽と地球の距離が変われば、地球に与える太陽のエネルギー量も

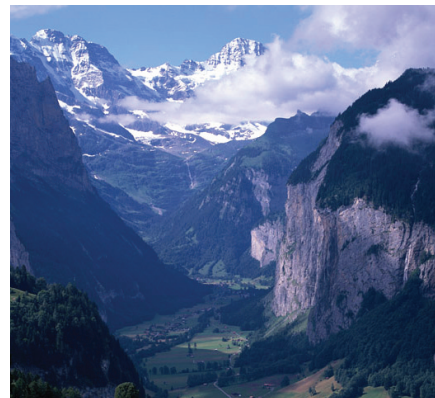


図4 スイスのU字谷



氷期モード



間氷期モード  
(現在)

図5 氷期と間氷期の地球

現在、主な氷床はグリーンランド氷床だが、氷期にはヨーロッパ北部の北ヨーロッパ氷床、北米大陸北部にはローレンタイド氷床という巨大氷床もあった。

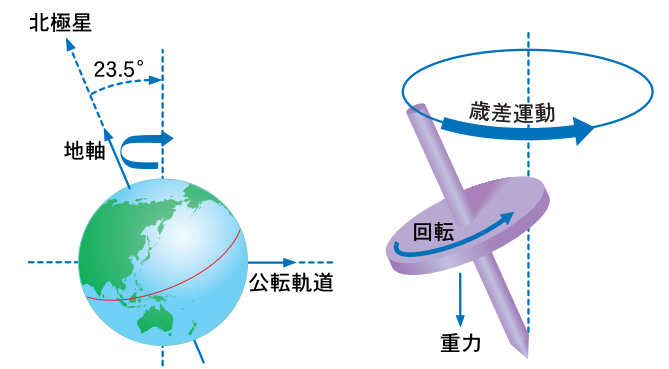


図6 自転軸の首振り運動

地球の地軸の首振り運動のことを歳差と呼ぶ。このような動きがあるため、現在の「北極星」はこぐま座のポラリスだが、占星術が成立した紀元前3000年ごろはりゅう座のトッパンが「北極星」だった。

ごくわずかですが変化します。

地球の自転軸の傾きも現在は公転軌道面に対して23.5度ですが、約4万年周期で22.1度から24.5度の間で変化します。さらに、自転軸がコマのように首振り運動をしているために生じる歳差（図6）などの結果、太陽からの入射エネルギーのバランスに変化が生じ、気候を変化させる要因になってきました。こういった地球の軌道要素の変化は、長期的な気候変動の重要なメカニズムなのです。地球の軌道要素の変動と氷期・間氷期とを初めて関連づけたのが、20世紀初頭のセルビアの研究者ミランコビッチです。彼はこれを手計算で一生をかけてやり遂げました。

ここで重要なことは、軌道の変化によって太陽からの入射エネルギーの地理的分布や季節的分布が変わっても、地球全体で受ける総量は氷期でも間氷期でもほとんど変わらないということです。つまり、入射エネルギー量にかかわらず地球の気候には氷期と間氷期という2つの安定状態があるのです。

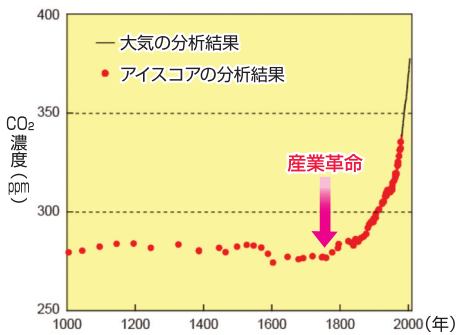


図8 過去1000年の大気中の二酸化炭素濃度

ハワイのマウナロア火山における観測結果に、アイスコア中の気泡の分析結果を重ね合わせたもの。人為起源の二酸化炭素が大気中に顕著に蓄積され始めたのが19世紀半ばであったことが分かる。それ以前の大气中の二酸化炭素濃度はおよそ280ppmである。

Etheridges et al. (1996) を改変

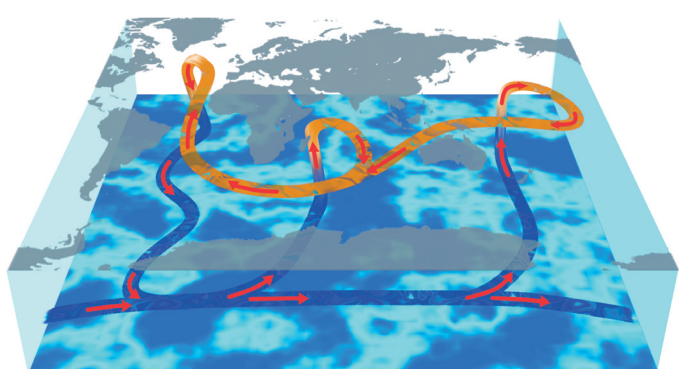


図7 深層水循環のコンベヤー・ベルト

ブロッカーの「コンベヤー・ベルト」と呼ばれる海洋の大循環を示した図。青色で示した深層水の流れに、オレンジ色で示した海洋表層の流れをつなぎ、海洋全体を一本の流れとして表している。

森林が広がると黒っぽくなり地球は温まります。実際の入射エネルギーと放射エネルギーのバランスだけで計算すると、地球の表面温度は-18℃になります。これは現実とかなりかけ離れた数字です。実は地球の平均気温が-18℃ではなく15℃という温度に保たれているのは、地球大気に「温室効果」があるからです。

大気中に含まれるガスのなかで最も大きな温室効果をもっているのは水蒸気です。次いで二酸化炭素、メタンなどが挙げられます。「温室効果」を最初に指摘したのはフランスの数学者フーリエです。電解質溶液の研究でノーベル賞をとったアレニウスは、1896年に発表した論文で、大気中の二酸化炭素濃度がいまの3倍になったら地球の温度は9℃上がると推定しました。当時は誰にも相手にされませんでしたが、非常に先駆的な仕事です。

1950年代後半から、アメリカのスクリプス海洋研究所のキーリングはハワイや南極点で大気中の二酸化炭素濃度の測定を始め、現在まで続けられています。これ

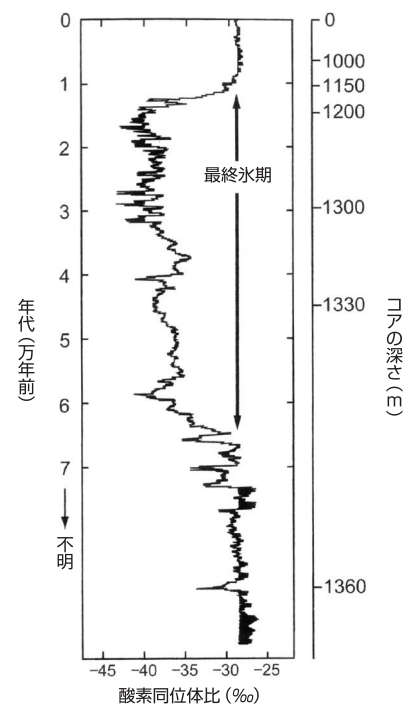


図10 グリーンランド氷柱の酸素同位体記録

ダンスガードが測定した、グリーンランドのアイスコアの酸素同位体比の記録。この分析結果から、アイスコアが最終氷期だけでなく、その前の間氷期の気候も記録していることが示唆された。

Dansgaard et al. (1969) , Dansgaard (2004) を改変。

を、過去の記録と合わせてみると、18世紀末の産業革命以降、大きく上昇してきたことが分かります（図8）。大気中の二酸化炭素濃度上昇の重要な原因が、化石燃料の燃焼にあることは間違いありません。では、大気中の二酸化炭素がどの程度気温を上昇させるのか。それをコンピュータを用いて研究したのが、かつて海洋研究開発機構（JAMSTEC）にも在籍されていたプリンストン大学の真鍋淑郎（まなべしゅくろう）教授です。地球をグリッドに切って流体力学と熱力学の法則を当てはめて計算するシミュレーション手法を開発しました。現在「地球シミュレータ」で行われている気候シミュレーション法の原点です（図9）。

## 氷で読み解く太古の気候

さて、先ほど海底の泥から気候を調べる話をしましたが、グリーンランドや南極の氷床には太古の水が堆積しています。この氷に含まれる酸素の同位体比を使った気候変動の研究も1960年代から行われています。デンマークのダンスガードは、グリーンランド氷床に建設されたアメリカ軍の基地で採取された1km以上の長さをもつアイスコアの酸素の同位体比を測定し、そこに過去の気温の情報が記録されていることを明らかにしました（図10）。

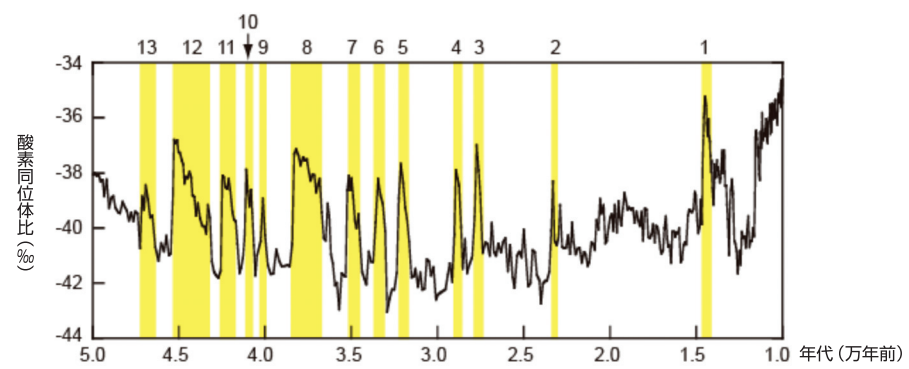


図11 ダンスガード-オシュガー・イベント

グリーンランドのアイスコアのなかに見られる、5万年前～1万年前にかけての急激な気温の変化（黄色い部分）。研究者の名前をとって「ダンスガード-オシュガー・イベント」と呼ばれる。オシュガーは1950年代、雪のなから初めてトリチウムという化学物質を見いだした地球化学者で、ダンスガードの共同研究者。

Grootes and Stuiver (1997) を改変

その後、南極のソ連のボストーク基地などでもアイスコア掘削が行われていました。南極はグリーンランドに比べて積雪量が少ないため、同じ長さのコアで数倍の年代をさかのぼることができます。この研究が画期的だったのは氷に含まれる大気化石、つまり閉じこめられた気泡から過去数十万年にも及ぶ大気中の二酸化炭素濃度を復元したことです。その結果、二酸化炭素濃度は気候変動と平行に変化していることが分かりました。詳しく調べると、気候が変動して炭素サイクルが変化し、それが大気中に二酸化炭素濃度の変動につながったことも分かりました。

## 短い周期で繰り返す気候変動

グリーンランドのアイスコアの分析では、「ダンスガード-オシュガー・イベント」という現象も発見されました。これは、氷期の間に、気温の急激な上昇下降が繰り返される現象です（図11）。この現象は、気候が急激に変動する性質をもつものであることを教えてください。その最たるものが1万2000年ほど前のヤンガー・ドリアス時代で、わずか50年で気温が5℃以上も上昇しました。これは、当時カナダ北部にあった氷床の融け水が一気に海洋に流れ込んで深層流を止め、熱分配ができなくなったことが原因ではないかと考えられています。氷床はある大きさになると底面に地熱がこもり、氷が融けて滑り出します。その融け水が深層流を止めて気候を寒冷化し、氷がある程度のサイズまで戻ると再び深層流が動き出すというのです。微妙なバランスで成り立っている深層流が、気候システムにとって重要な働きをもっていることが分かります。

日本の江戸時代から明治の初期ぐらいまでは、世界的に気温の低い小氷期がありました。しかし、この小氷期の原因はよく分かっていません。そして、その後、1900年頃から世界中の氷河が急速に後退していることも調査で明らかになっています。これは気温が100年で0.8℃上昇したことを反映しています。

## 温室効果ガスのロシアンルーレット

過去の気候変動を調べることで、気候が非線形性をもつシステム、つまり急激に上昇したりする可能性を秘めたものであることを知ることができました。その一方で、細かく見ればそれはきわめて複雑なシステムで、完璧な予測は非常に難しいものです。アメリカの地球化学者ブロッカーはかつて、「温室効果ガスが地球温暖化の原因であると100%証明できないという事実は、さして重要なことではない。むしろ、人類の生活基盤である『気候』に対して温室効果ガスを加えるロシアンルーレットを行っていることが問題だ」と言いました。私たちは長い間「安定した気候」の恩恵を受けてきましたが、現在起きつつある地球温暖化の倫理的な側面も忘れずにおきたいものです。 **BE**

