

地球環境は大域的かつ動的に変化している。しかし、我々はその変化を詳しく知ることは難しい。国際的に気象観測網が整備されて数十年、わが国の気象記録も 100 年余りしかない。温暖化など、地球の気候変動を長期的に考える上で、地球環境がどのような変化を辿ってきたかを知ることは非常に重要なことであるが、気象観測データが整備される前の気温推移などの情報をどのようにして得るのかという問題がある。

そこで授業で紹介されたのが、氷床コアによる過去数万年の地球環境変動を復元する試みである。地球上の大気循環により、極地域には地球上から様々な物質が集まり、降り積もる雪や、大気とともに堆積していく。そして、上部に降り積もった雪によって下部は圧縮され、密度が 0.83 を超えると「氷」となり、それまで外気と繋がっていた大気が独立した気泡となって氷の中に閉じ込められる。このとき体積で 10% の大気が氷の中に残り、これを解析することで、逆に堆積した当時の状況を知ることができるという仕組みである。氷床以外にも、侵食の少ない海底や湖底のコアを利用する研究も行われており、海底の場合は最大で 2 億年程度まで遡ることができる。また、地層を解析することでは数億年以前より太古も解析することが可能となる。逆に近年のデータを知りたい場合などは、木の年輪や、サンゴなどを解析することで、気温などの情報を得ることが可能である。これらの中で氷床コアは、当時の大気や指標を凍結して閉じ込めるので解像度で優れている。

現在、日本は南極大陸にて第二期ドームふじ計画と呼ばれる大規模な氷床調査を行っている。第一期では深さ 2503m を掘削し、過去 32 万年間の地球環境を復元したが、第二期はそれを超える復元を試みるものである。ドームふじは、年平均気温が -55 度という南極大陸奥地に位置しているが、これは観測精度を上げるためである。氷床は、お椀を伏せたように南極大陸岩盤を覆っているが、自分自身の重さで歪み氷河のようにゆっくりと海へ流れ出しているため、古い堆積層がなくなっていたり、掘り出した氷床データが歪みを持っていたりする。こういった影響をなくすために、氷床ドームの頂上部分を掘ろうとしたものが今回の計画であり、これまでの一番古い氷とされるポストーク基地の氷床に比べ、掘削距離では短いものの、年代では倍になる 80 万年前の氷を手に入れることができると期待されている。なお、氷床を掘削した後にはその掘削孔を利用して、鉛直流動・歪み・温度などの各種分布が測定されることになっており、これによって氷床の流動シミュレーションの精度向上が可能であり、詳細なモデル作りに役立つ。

ところで、このポストーク氷床の際に興味深い発見がされた。1998 年に 3500m ほど掘り進んだところで、雪が押し固められた氷ではなく、水が凍ってできた氷であると推測される

氷が見つかり、音波や電波を使った観測により、少なくとも長さ 240km、幅 50 km、深さ 1200mの巨大な湖（ポストーク湖）があることがわかった。なぜ液体の水が存在するかについて、300 気圧に及ぶ圧力や、海面下 300mに位置するための塩分、氷床移動による摩擦熱などの様々な説が出ているが結論はでていない。もし生物がいれば、南極が氷に覆われて以来数百万年もの間隔離され続けてきた生態系が存在していることになり、汚染を防ぐために掘削は中止されたが、調査を再開したという話もある。低温高圧、光も酸素も栄養もない世界でどのような生物が済んでいるのか非常に興味があり、この湖を研究することで、木星の衛星であるエウロパの地面下に存在すると言われている水の海に、生物が存在するかどうかを推測する上で大きなヒントを与えることにもなる。しかし、現在の科学では全く汚染せずに地下 3000mの湖を調査することは不可能に思え、全く汚染しないという確証がない限り、探究心よりも唯一無二の資源を保全することを優先すべきであり、調査すべきでないと思う。

さて、氷床コアからは様々な物質の情報が得られる。

最も有名なものは ^{18}O 同位体比の測定である。なぜこれが有名かというと、これにより当時の気温がわかるというのである。酸素では ^{16}O が最も多いが、 ^{18}O も 0.2%を占める。ここで、重い ^{18}O を含む水は気体になりにくく、蒸発側では液体よりも 1%だけ ^{18}O の量が少ない。また、寒いときは蒸発量が少ないので ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は小さくなるが、暑いときは重い ^{18}O でも蒸発しやすくなるので、($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) は大きくなる。また、雪になるときも ^{18}O が含まれる水から凝結してゆくため、南極の奥地ほど、 ^{16}O の雪が降ることになる。これらは次のような非常にはっきりとした関係を持つことがわかっており、これを利用して各時代の平均気温を求めることが可能になるのである。

$$\text{酸素同位体比： } ^{18}\text{O} (\text{‰}) = (\text{試料の} (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \div \text{標準海水の} (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) - 1) \times 1000$$

$$^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0.67 T (^\circ\text{C}) - 13.7 \text{ (切片はサンプルをとった場所によって変わる)}$$

また、氷に密封された気泡から当時の大気中にあった物質の濃度、例えば地球温暖化の原因とされる CO_2 や、 CH_4 の濃度もわかる。密封されているのは気体に留まらず、氷床に含まれているダストは、気温の低下にとともに増加していることも確認できる。氷期には海面が低下して陸地が広がり、ダストが大量に舞上がったことが予想され、海洋に大量に降下したダストが植物プランクトンを大繁殖させ、プランクトンが温室効果ガスである二酸化炭素を吸収し、寒冷化を加速したというメカニズムも考えられている。

氷床からデータを得ることはできるが、このままではいつの時代のデータかを知ることができないので、学術的にはあまり意味のない試料となる。例えば、異なる地点での気候変動を議論するときなどは、時間軸が間違っていたら意味がないため、試料としての有用性をなすには氷床コアに年代軸を入れる作業が必要なのである。

前述したとおり、氷にはダストも含まれているが、これが非常に集まっている部分がある。これは火山の噴火を指すものであり、有史以来の噴火記録や放射壊変によって年代を特定することができる。逆に噴火の規模をダストから知ることでもでき、 10^8 トン以上の噴出物を出した火山活動が過去 1400 年間に 5 回以上あったこともわかる。

また、夏と冬によって氷の層や電気伝導度が変わることを用いることで細かな年代を調べることができるが、拡散減少のため氷床が深くなるに従って区別できなくなる。

そのほかにも、メタン濃度の変動を用いる手法や、近年の大規模核実験によって生じた¹³⁷Cs などの人工放射性核物質を用いる方法があり、更に第一期ドームふじ計画の結果から、深層部でも年変動に相当する指標変動が観測されるなど、研究が進んでいる。

今から約 1 万年前までの地球は、非常に寒い「氷期」であった。北米大陸の北方にはローレンタイド氷床という南極とほぼ同じ大きさの氷床あるなど、地球は氷に覆われており当時の海水面は現在より 130m も低くなっていた。氷期は過去 100 万年で 8 回あり、氷期と氷期の間は短い間氷期になっており、現在はウルム氷期が終わった後の間氷期に当たる。

先ほどの酸素同位体比を見てみると、1 万年くらい前から現在の間氷期では酸素同位体比はほとんど変動せず、それ以前の氷期では逆に酸素同位体の量が大きく変動している。氷期の間は 100 年で 10 度も気温が変動することもあったが、間氷期になると変動幅は 0.6 度程度と安定する。なぜこのような安定性と不安定性が現れるのかは解明されていない。

氷床には幾つかの氷期と間氷期の環境が保存されており、これを解析することで気候変動を知ることができる。特に今回のドームふじ計画では氷床底部で今までになく古い 80 万年前までの記録を得ることが期待されており、これは氷期サイクルの原因解明に大いに役立つものである。なぜなら氷床以外の調査から、氷期サイクルが見られるのは第四紀(170 万年前～現在)のみであり、第四紀でも特に地磁気が逆転した 70 万年前程度から変動幅が大きくなり、10 万年周期が卓越してきたということがわかっている。つまり、氷期サイクル発現期にあたる部分を詳細に解析することができるため、今まで以上に研究が進むことが予想されるのである。

氷期などの大規模気候変動を解く上では、複数個所のデータを比較することも重要である。例えば、グリーンランドと南極での氷床コアを比較してみると、拡散現象は短時間で起こることから、メタンの濃度変動はほぼ一緒であることがわかる。しかし、酸素同位体変化においては状況が異なる。例えば北極では激しく立ち上がるのに対して、南極ではゆっくりと上下しているといった形状の相違が見られる。またその変動は、平均で 1000～2500 年程度南極が先行している。この特徴は、大気海洋系の循環(熱塩循環：水を冷やすか塩分濃度を高めれば密度が大きくなって沈み込む)が大きく寄与しているのではないかとされている。北極付近で沈み込み、南極付近を通して、インド洋や日本沖で湧き出し

ているという大規模な循環であるが、これが地球規模での熱輸送を行っているというのである。この熱塩循環を取り入れた理論として、次のようなものがある。

温暖化などにより海水の沈み込み域での大規模な氷床の崩壊がおこり、それによって淡水が流入すると、熱塩循環を一時的に停止させることになる。これにより暖流の北上が制限されることになり、数千年単位で北極付近では温度が低下し、南極では温度が上昇する。北極付近での温度低下に伴い氷床の崩壊がなくなると、淡水流入もなくなり再び熱塩循環が構築され、北極付近の温度は急激に上昇をはじめ逆に南極は低下する。また、再び最初の状況に戻り、同じことが繰り返される。

気候変動に大気海洋系、特に熱容量の大きい海洋の循環が大きく寄与していることは間違いないと言われるが、それを解明するためには、地球の冷熱源となっている両極域のデータだけではなく、熱供給源である赤道域のデータの重要性も非常に高くなっていく。赤道域に氷床はないため、例えばサンゴ化石の骨格年輪による気候変動の解析などの研究が現在進行中である。

この氷期の研究は温暖化の研究にも繋がる。過去のコア解析から、過去 32 万年間、気温と二酸化炭素濃度がきわめて類似して変動していることが明らかになっている。更にコア中の二酸化炭素は 18 世紀から増え続けて、特に 1900 年代の初頭からは急激に増えており（産業革命以前 280ppm 現在 355ppm）、メタンも以前の 800ppb から産業革命以降急激に増えてきている。この上昇は化石燃料に起因することは明らかであるが、果たしてこれらの上昇がどれほど最近の温暖化に寄与しているかは正確にはわかっていない。温暖化は間氷期の気候変動によるもので、人為起源はないという人までいるほどである。二酸化炭素などの排出対策をとるためには、どれほどの量に制限すればどうなるかがわかる必要があり、そのためには正確なモデルが必要である。長期の正確なモデルを作ろうとすると、氷期や間氷期といったシステムの解明も当然必要になってくるし、気候変動と熱塩循環がどれほど対応しているのかも確かめる必要がある。その一つのアプローチとして、氷床コアの解析が存在するのである。

なお二酸化炭素対策を地球表層から半永久的に隔離する手段として、海洋地盤へ直接投入し、炭酸塩として固定する方法が授業で紹介された。地球上の海嶺から 100km の幅を固定のために使え、数十万年分の容量はあるという。非常に興味はあるが、頁の都合上、紹介だけになってしまった。二酸化炭素と温暖化の関係は定かではないが、現在の二酸化炭素量は過去と比べても異常であり、早急に何らかの対策をすることは必要だと感じる。

参考文献：ドームふじ観測計画 <http://domefujii.at.infoseek.co.jp/>

：氷期・間氷期サイクルと地球の軌道要素（増田 耕一）

<http://web.sfc.keio.ac.jp/~masudako/publ/geosci/milankovic/>