

# 南極の氷の解析から氷期サイクルの仮説を検証

川村賢二

10万年周期で繰り返される氷期と間氷期。このサイクルは、北半球に降り注ぐ夏の日射量の増減が原因とされてきたが、それを裏づける証拠はこれまでなかった。国立極地研究所の川村賢二助教らは、南極の氷に閉じ込められた過去36万年分の大気を分析。この仮説を強く支持する結果が得られたとして、*Nature* 8月23日号に発表した<sup>1</sup>。南極の氷の分析結果について川村助教に話を聞いた。

## 南極の氷に閉じ込められた数十万年の地球環境

**Nature Digest** — 氷期サイクルの仮説とはどんな説ですか？

**川村** — 氷床が拡大する寒冷な氷期と、比較的暖かい間氷期とが、なぜ10万年周期で繰り返されるのか？ それを説明するのが「ミランコビッチ理論<sup>\*1</sup>」とよばれる仮説です。北半球に降り注ぐ夏の日射量が周期的に変化し、それがきっかけとなって氷期と間氷期が訪れるのではないかというものです。地球の公転軌道は、約10万年の周期で円から楕円形に変化します。また、約4万年周期で地軸の傾きが変わったり、約2万年周期で歳差運動<sup>\*2</sup>による地軸のぶれが起こります。地球が太陽から受ける日射量の地理的な分布は、この3つの要因によって周期的に変動します。

**ND** — 仮説を裏づける証拠はこれまでなかったのですか？

**川村** — 発表当時は支持されなかったのですが、1970年代に海底堆積物から得られたデータに、ミランコビッチ理論が示す変動周期が反映されていることがわかって、一気に脚光を浴びることになったんです。ただ、そこで新たな謎が出てきた。それが10万年周期です。日射量の変動は、2万年周期のシグナルがいちばん強く、10万年周期はごくわずかなんです。それなのに、実際の氷床の量の変動は、10万年周期がはるかに強く支配的です。単純に日射量の変化が氷床の量を増減させると考えると、説明ができないんですね。

**ND** — それを検証するために、南極の氷床コアを分析されています。氷床コアから何がわかるのでしょうか？

**川村** — 氷床というのは、南極とグリーンランドを覆う厚い氷のことで、降り積もった雪が圧縮され、氷に変化しながら堆積したものです。氷に変化する際、雪と雪のすき間にあった空気も気泡として氷の中に取り込まれます。氷床をボーリングして採られた氷床コアには、過去の空気そのものが閉じ込められているわけです。この氷や空気を分析することで、当時の気温や大気の循環、二酸化炭素やメタンのような温室効果ガスの濃度を知ることができます<sup>2,3</sup>。氷床コアは、過去の地球環境を記録した「タイムカプセル」といえるんですね。今回用いたのは、第1期ドームふじ氷床深層掘削計画<sup>\*3</sup>で掘削された深さ2503メートルの氷床コアです。そこには約34万年間の地球環境が記録されています。

**ND** — どのような分析をしたのでしょうか？

**川村** — 氷の中に閉じ込められた空気から、酸素と窒素の濃度比<sup>\*4</sup>を調べました。要するに酸素濃度です。分析の結果、氷床コア中の酸素濃度の変動が、南極における夏の日射量の変動パターンと一致することがわかったんです。日射量の変動の年代は、地球の軌道運動から正確に計算で求められるので、その年代と酸素濃度のデータを対比して、氷床コアの年代を精密に出すことができます。今回は、1000キロメートルほど離れたポストーク基地で掘削された氷床コアのデータも用いて、約36万年間の年代を出すことに成功しました。これまでは年代の誤差が大きく、ミランコビッチ理論の検証ができなかったのですが、今回、正確な年代がわかったことで初めて、地球規模の気候変動と日射量の関係を調べられるようになったわけです。今後、この年代を用いて気候モデルを検証することで、将来の気候変動の予測も精度が上がるといいますし、メカニズムを解明する際の土台にもなるでしょう。そういう年代が出せたことは、大きな意義があると思っています。

## 10万年周期で起こる気候変動のシナリオ

**ND** — 氷期—間氷期と日射量はどんな関係にありましたか？

**川村** — 氷床コアの氷(H<sub>2</sub>O)を構成する酸素の同位体の量を調べることで、過去の気温がわかります。重い酸素同位体の比率が小さいほど、その氷ができたときの気温が低いと推定できます。また、空気の分析からは過去の二酸化炭素濃度がわかります。こうして復元した南極の気温や大気中の二酸化炭素濃度と、北半球の夏の日射量を比較したところ、日射量が変わるタイミングに数千年遅れて、気温や二酸化炭素濃度が変化しているという結果が得られました(図1)。要するに、日射量の

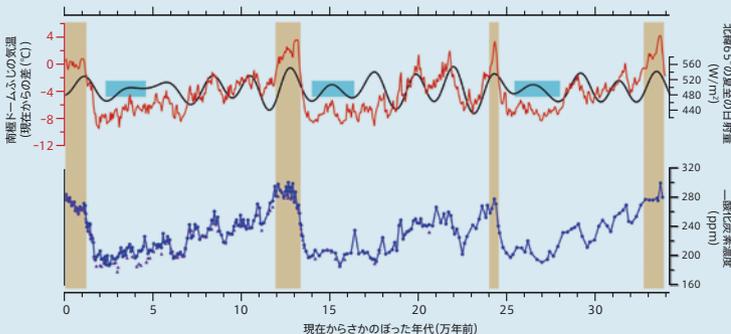


図1 ドームふじにおける気温(上段赤線)、北緯65度の夏至の日射量(上段黒線)、大気中の二酸化炭素濃度(下段)の比較。北半球の日射量ピークが小さい時期(水色の期間)に、氷床が極端に拡大。日射量が増大し始めると、それをきっかけとして氷床が崩壊し、間氷期(オレンジ色の期間)に移行する。二酸化炭素濃度は南極の気温変動と調和的に変化していることから、気候変動を増幅する役割をしていたことがわかる。



川村賢二（かわむら・けんじ）／国立極地研究所研究教育系気水圏研究グループ助教。理学博士。1970年、東京都生まれ。1994年、東北大学理学部天文・地球物理学科第二卒業。2001年、同大学大学院地球物理学科博士課程修了。2002年スイス・ベルン大学研究員、2004年アメリカ・スクリップス海洋学研究所研究員、2006年東北大学助手を経て、2007年4月より現職。

専門は古気候学。極地の氷床コアに含まれる気体の分析によって、過去の気候変動や温室効果ガスなどの大気組成の変動を復元、気候変動や温室効果ガスの循環のメカニズム解明をめざしている。博士課程の研究で、第1期ドームふじ氷床コアの気体成分を分析。2002年にはスイスへ、2004年にはアメリカへ渡り、欧米が掘削したさまざまな氷床コアの気体分析や分析技術の開発を行った。2006年に帰国し、極地研究所と東北大学の共同研究として、第2期ドームふじ氷床コアの気体分析に取り組む。現在、同研究を継続して行っている。

変化が即座に気候変動を引き起こすわけではなく、北半球の氷床が拡大したり融けたりするのに少し時間がかかり、その影響が地球全体に伝わるということだと思います。

**ND** — なぜ「北半球」なのでしょう？

**川村** — 北極圏は南極とは違って、海が中心にあって、周辺に陸地があります。氷や雪は真っ白で太陽光線をほとんど跳ね返してしまうため、氷床ができ始めると余計に寒くなって、氷床はどんどん大きくなっていきます。氷期の最盛期には、カナダ全土とアメリカ北部、ヨーロッパや西シベリアの北部を氷床が埋め尽くしていました。しかし、日射が強くなって氷床が融け始めると、地面が露出してきます。地面は日射を吸収しますから、気温が上がり、余計に氷床が融けていく。このように、北半球の方が氷床や温度の変化の幅がはるかに大きいんですね。まず、北半球でものすごく大きな変化が起こって、それが地球全体に影響すると考えられるわけです。

**ND** — 10万年周期の変動は、結局どのようにして起こるのでしょうか？

**川村** — 氷期から間氷期への移行を「ターミネーション」といいます。過去4回のターミネーションのタイミングを調べてみると、すべてが北半球の日射量が増加していく時期に起きていました。また、ターミネーション直前に、日射量があまり変動しない時期がみられます（図1）。この時期は、地球の公転軌道が円に近いときです。地球が常に太陽から同じような距離にあるため、楕円軌道のときに比べて日射量があまり変わらないのです。夏に日射量がある程度増えないと、前の年に積もった氷床が融けきらず、氷床は拡大していきます。ところが、極端に氷床が発達してしまうと、氷床の重みで地殻が沈んで標高が下がったり、地熱の影響で氷の温度が上がったりして、今度は氷が融けやすくなっていくんですね。このときに、何かのきっかけさえあれば、一気に氷床の崩壊が起こるはずなんです。

**ND** — 氷床が崩壊してなくなり、急激に間氷期に突入するということですね。

**川村** — はい。そのきっかけが、公転軌道が楕円に移るときの夏の日射量の増加ではないかと推測できます。公転軌道は10万年周期で変動しますから、間氷期もまた10万年に1度の周期で訪れるのではないかと思います。このように、南極の気候変動は、北半球の夏の日射量の変動が引き金となって起こっていると考えられ、ミランコビッチ理論を支持する結果になったということです。

## さらに古い時代の解明へ

**ND** — なぜ、このような研究に携わるようになったのですか？

**川村** — もともとは気象学をやりたいと思って、東北大学の地球物理学科に入ったのですが、地球規模の温室効果ガスの循環などを研究している研究室があるのを知って、とても魅力的に思えたんですね。グローバルに研究を展開する研究室でしたので、自分のテーマの氷床コア以外のことも、かなりいろいろやりました。というより、やらされてきました（笑）。ところが、この下積み時代の経験が、海外で研究員をするようになって非常に役立ってきましたね。1人でなんでも分析し、考えてきたおかげで、いろいろな専門の研究者と議論ができ、技術的な面でも不可欠な貢献をたくさんすることができたんです。

**ND** — 今後、めざしていることは何ですか？

**川村** — ドームふじコアは、現在3035メートルまで掘られていますので、さらに過去にさかのぼって分析し、まずは年代軸を確定するという仕事が先にきますね。また、今は全体をざっと見るといった段階なので、今後はもっと精度をあげて細かく見ていく作業をしたいと思います。まだまだ膨大な作業があります。早く極地研究所にも分析設備を整えて、スピードを上げていきたいですね。

**ND** — ありがとうございます。 ■

## 聞き手は財部恵子（サイエンスエディター）。

### \* 1 ミランコビッチ理論

旧ユーゴスラビアの地球物理学者 M. ミランコビッチ（1879～1958）が、1930年代に提唱した氷期の原因についての仮説。他の惑星の引力による地球の公転軌道の離心率（円からのずれ）、自転軸の歳差運動や傾きの変化によって日射量に変化し、氷期と間氷期が訪れるというもの。

### \* 2 歳差運動

回転するコマの軸が円を描くような首振り運動をするのと同様に、地球の自転軸が周期約2万年で首振り運動をしていることをいう。

### \* 3 第1期ドームふじ氷床深層掘削計画

南緯77度にあるドームふじ基地は、日本の氷床コア掘削拠点。1994年から1997年にかけて第1期の掘削計画が行われ、深さ2503メートルの氷床コアが掘削された。現在は第2期掘削計画が進行中。2007年1月の時点で3035メートル（約72万年）のコアを掘削。

### \* 4 酸素と窒素の濃度比

酸素分子は窒素分子より小さいため、大気が氷床に閉じ込められるときに、酸素がわずかに外へ逃げるが、その度合いは雪粒の大きさや形によって変化する。雪粒の性質は、夏の日射量によってどれだけ加熱されるかで決まるため、過去の日射量がコア中の酸素濃度として記録されていることになる。

1. K. Kawamura *et al.* *Nature*, **448**, 912-916(2007)
2. O. Watanabe *et al.* *Nature*, **422**, 509-512(2003)
3. K. Kawamura *et al.* *Tellus*, **55B**, 126-137(2003)