

# 南極から見た過去 100 万年の気候変動史

## One million years history of paleoclimate change -A view from Antarctica

伊村 智\*

### 1. はじめに

今回の気象・環境セミナー「気候変動と植生変化，農業の適応」では，それぞれの研究分野における最先端の研究内容が報告されている．気候変動史を正面から語るのは他のレポートにお任せし，本稿では「南極からの視点」という言わば傍流から，気候変動に関わる話題を紹介してみたい．

近年注目を集めている環境問題としては，太陽エネルギーと地球の大気環境の関わりのうえでも重要なオゾンホール問題と，急激な進行が危惧される地球温暖化問題がある．これら2つの環境問題について，南極研究が果たしてきた役割は極めて大きい．

### 2. 南極の重要性

そもそも地球環境問題を語るうえで，なぜ南極という視点が重要なのであろうか．そこは地球儀では「底」の部分であり，南極点を取り巻く寒冷な一帯である．人間活動，特に歴史的に汚染物質の放出源の中心であった北半球中緯度からは，地球上で最も離れた地域であるといえよう．人間活動の影響を調べるのであれば，放出源を見張るのは当たり前である．しかしここで問題とするのは，そのようなローカルな環境で与える影響ではなく，地球という惑星規模でのグローバルな環境に与える影響である．さらに，短時間で変動幅の大きい人間活動のタイムスケールではなく，場合によっては惑星，太陽系レベルでの変動を考慮した，長時間変動である．このような目的で環境を見ようとするとき，放出源周辺でのデータはある意味，ノイズでしかない．人間活動による汚染物質の放出は，地球大気の大循環によって，年単位の時間レベルで遙かな南極にまで到達するが，その時には地球全体の情報が平均化された，安定したものとなっている．南極で測定される大気環境データ

は，地球環境の数年レベルの代表値と言って良い．

例えばかつて，大気中の二酸化炭素濃度が問題になり始めた数十年前には，人間活動の影響を受けにくい太平洋の真ん中にあるハワイでの観測データが，地球環境の代表値としての意味を持っていた．ところがハワイは急速に発展する東アジア地域の影響を受けることから，現在最も信頼できるデータとしては，南極大陸の観測基地からのものが使われるようになっていく．「南極は地球環境の窓」と言われる所以である．

### 3. オゾンホール

1982年の9月，南極昭和基地の初春にあたるある夜，いつものように光学機器による大気成分測定を行っていた越冬中の気象隊員は，基地上空のオゾンがほとんど消失していることを発見した．これが，南極大陸を覆うほどの成層圏オゾン層の消失現象，いわゆるオゾンホール発生の端緒となった．

オゾンは上空約15～20kmに集積している気体成分で，化学式で表すとO<sub>3</sub>．有害紫外線を吸収する効果を持つ気体である（図1）．有害紫外線は，単に日焼けや雪目を引き起こすばかりで無く，皮膚ガンの原因にもなるし，最終的には細胞内のDNAに損傷を与える，極めて危険な存在である．そもそもオゾン層が安定して存在しているからこそ，地上の生命は安全に生きてゆくことができるといっている．南極の春先の数ヶ月とはいえ，また南極大陸上空に限られた現象ではあるが，オゾン層がほぼ完全に消失しているという事実は，世界中に衝撃を与えた．その後，オゾン破壊の原因物質として，エアコンなどの冷媒や電子機器製造過程で使用されていたフロンが特定され，世界はこの使用制限に一気に動

\* 情報・システム研究機構 国立極地研究所

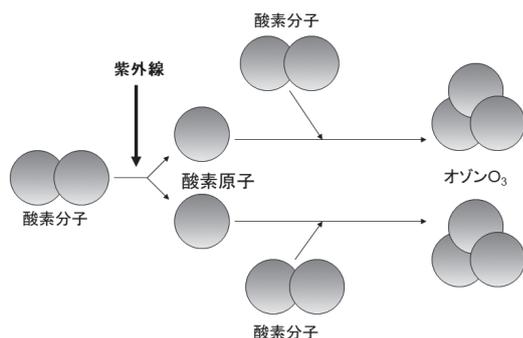


図1 オゾンの構造と成因

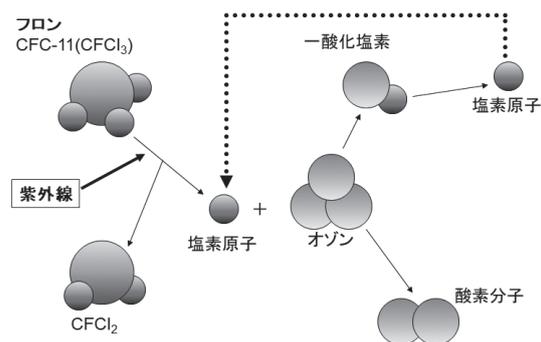


図2 フロンがオゾン破壊する仕組み

いた。1987年、オゾン破壊する恐れのあるフロンの製造、消費および貿易を規制する目的でモントリオール議定書が採択され、以後の人為的なフロン放出は大幅に減少している。フロンは安定した物質で、これまでに放出されたものが残留しているため、いまだに南極上空のオゾンホールは毎年発生し続けているが、やがては縮小してゆくことが予想されている。

フロンがオゾン破壊する機序は、以下の通りである(図2)。フロンは紫外線を受け、分解して塩素原子を放出する。放出された塩素原子は反応性が極めて高く、大気中のオゾンと反応してこれを酸素分子と一酸化塩素に分解する。やがて塩素原子は酸素原子を手放して再び次のオゾンに襲いかかる。塩素原子によるオゾン破壊が繰り返されることで、最終的に一分子のフロンの大量のオゾン破壊することになる。ではなぜ、フロンの放出源である中緯度地域でオゾンホールは観測されず、南極上空でのみ発達するのであろうか？実はオゾン破壊反応がおこるためには、いくつかの条件が揃う必要がある。それが、オゾンが効率的に破壊されるための閉鎖環境、破壊に必要な低温、フロンが塩素原子を放出するための紫外線である。南極上級には初春から初夏にかけて、極を取り巻く強力な大気の流れである極渦が発達し、その内部は外部とは切り離された隔離環境となる。ここが言わば「反応の場」となる。ここにオゾン破壊反応に必要な低温と紫外線照射が揃う期間にのみ、オゾンホールが発生するのである(図3)。やがて盛夏に向かい、極渦の崩壊とともに極域外からオゾンが流れ込み、オゾンホールは消失する。この機序が働くため、オゾンホールは南極上空でしか観察されないのだ。

オゾンホールは、人類が歴史上、最も効率的に解決した(解決に向かっている)地球環境問題として記憶されるべきものである。現象の発見から国際規

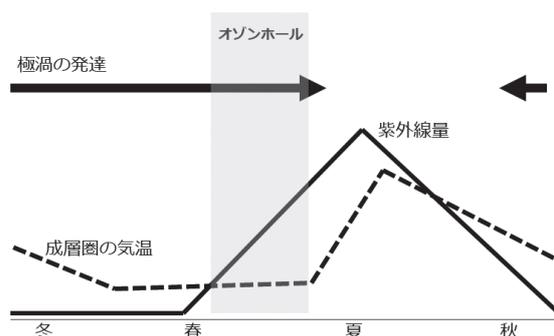


図3 オゾン破壊の条件が揃う時期

制条約の成立までわずか5年しか経っていないのだ。昭和基地での発見が引き金となって科学者が原因を突き止め、政治がフロン業界を動かし、世界が規制の網をかけたのである。

この日本の大きな貢献を振り返るとき、一つ忘れてはならない重要な点がある。昭和基地でオゾンホールが発見されたのは、たまたま基本観測項目としてオゾン量の測定が続けられてきたからである。集中的に狙った発見では無かったのだ。ここで重要なのは、地味で目立たない継続的なモニタリング観測の重要性である。様々なデータを長期的に積み上げてゆくことで、あるときそこに大きな変動が見いだされ、大発見に繋がる。地味な作業であり、データの積み上げ中はその意義も主張しにくいのが、このモニタリングこそが現在でもあらゆる南極観測の基本となっている。

#### 4. 地球温暖化

オゾンホールの問題と同様、温暖化においても、南極大陸は重要なモニタリングの拠点となっている。特に南極半島地域の気温上昇は著しく、すでに陸上の雪氷の融解が加速しているという報告もある。さらに南極の特性を活かし、過去の気候変動の記録に基づいて現在の変動の意味を理解し、さらに

将来を予測するという歴史的な研究が注目されている。地球温暖化問題については、実は南極が中心的な役割を担っているとさえ言える。

南極大陸は本来、他の大陸同様に山あり谷ありの複雑な基盤地形をもつが、寒冷な気候のため降り積もった雪が溶けずに積み重なり、やがて押し固められた雪が氷となって大陸のほとんどを覆い尽くしている。山岳の谷を埋める氷が氷河と呼ばれるのに対し、陸地を覆う氷は氷床と呼ばれるが、どちらも高所から低所へゆっくりと流動している。南極氷床は面積が約 1,400 万 km<sup>2</sup>、平均 2,500m を越える厚さを持ち、体積は 3,000 万 km<sup>3</sup>、これは地球上の淡水の 60% 以上を占める。表面標高も最高部で 4,000m を越えている。

氷床のもとものが降雪であるということは、そこには毎年降った雪が地層のように積み重なり、氷床の深部には昔降った雪が氷として残されているはずである。降り積もった雪には降雪時の大気を取り込まれているから、言わば凍り付いた大気の化石が保持されていることになる。酸素や二酸化炭素などの大気成分濃度が分析可能であろうし、また安定同位対比を用いれば当時の気温も分かるはずである。このアイデアに基づき、南極氷床を表面から底部まで掘削して氷の柱であるアイスコアを掘り出し、これを表連続的に解析する計画が立ち上がった。日本は、昭和基地から内陸に約 1,000km 入った標高 3,810m 地点にドームふじ基地を設け、1995 年より第 1 期掘削を開始した。このとき得られた長さ 2,500m のアイスコア解析からは、過去 34 万年の地球環境変動に関わる情報が得られている。さらに 2003 年からの第 2 期掘削では、3,000m を越えるアイスコアの回収に成功し、年代は 72 万年前にまでさかのぼられた。我が国の独自開発の掘削ドリルは、極低温、高圧環境でも効率よく、亀裂の少ない高品質のアイスコアを回収することのできる極めて高性能なもので、得られたサンプルを用いた高分解能の地球環境変動データは、世界的にも高い評価を得ている。これはまさに、日本の物作り技術と高精度の分析技術、および研究者と技術者の粘り強い努力の成果であったと言える。

日本による第 2 期ドームふじアイスコア掘削により、過去 72 万年の気温、二酸化炭素濃度の変動が高分解能で詳細に明らかになっている。それによると、地球環境は約 10 万年周期で変動しており、およそ 1 万年の短い温暖期（間氷期）と 9 万年の長い寒冷期（氷期）が繰り返し訪れていることが分かっ

た。現在は最終氷期が約 1 万年前に終了したあと急激に温暖化し、その後安定しつつもゆっくり寒冷化している時期にあたり、後氷期と呼ばれる。これまでの 10 万年周期をもたらした原因は主に地球の地軸の揺らぎに起因するとされているため、これが維持されているならば地球は間もなく次の氷期に向けて急激に寒冷化することが予想される。一方で、二酸化炭素濃度も気温と同様に 10 万年周期で上下していることが明らかになった。しかし現在のように 400ppm を越えて急激に増加する二酸化炭素濃度は、地球がこの 72 万年の間に経験したことがない。人類起源の二酸化炭素が現在大気中に大量に蓄積されていること、二酸化炭素を初めとする温室効果ガスが大きな気温上昇をもたらしつつあることは、気象研究者の間では疑いようの無い事実と受け止められている。現在の二酸化炭素濃度の前例のない上昇が、急激な温暖化暴走をもたらすのか、地球がこれまでに示してきた 10 万年周期の気温変動サイクル通りに、近い将来、次の氷期に向けて低温化するのか（図 4）。今我々が明らかにすべきは、地球本来の気温変動サイクルの詳細な仕組みと、人為的に引き起こされる温室効果とのバランスである。

このための取り組みとして数年後から、100 万年を越える太古の氷を目指した第 3 期氷床掘削が始動する予定である。実は気候変動サイクルは、4 万年周期であったものが 10 万年周期に、約 100 万年前を境に変化していることが明らかになっており、この変化の仕組みの解明が期待されているのである。このような詳細な気候変動の理解が、今後の変動予測に欠かせない情報を提供してくれるであろう。また 100 万年を越えるアイスコアを回収することができれば、77 万年前に起こった地球史上の一大イベント、松山 - ブリュンヌ地磁気逆転をカバーすることができる。地磁気が逆転する時期には、地球は一時的に地磁気のバリアーを失い、太陽放射線にさ

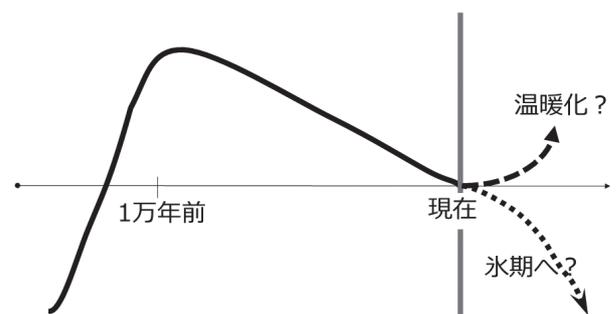


図 4 温暖化か寒冷化か？

らされていた可能性が指摘されている。この時期に地球上に何が起こっていたのか、高分解能のアイスコア解析による分析が期待される。

## 5. これからの地球環境と南極

南極における気象観測から温暖化による気温上昇の現状が報告され、氷床コア解析からこれまでの変動リズムが明らかとなり、さらに今後の変動を予測する情報が集まりつつある。まさに南極は、地球温暖化問題理解のキープレイヤーであることが理解出来ると思うが、更にもう一点、地球温暖化の進行が社会におよぼす影響においても、南極は大きな影響をもたらすと考えられている。これが、海水準の上昇である。

南極氷床は、大陸に乗った淡水の氷の塊である。3,000万 km<sup>3</sup> もの膨大な淡水の氷が大陸の基盤岩に乗っているため、岩盤自体が氷床の重さで沈み込んでいる程のボリュームである。これが万一完全に融解してしまった場合、何が起こるであろうか。陸上に凍り付いていた氷床が液体となって海洋に注ぎ込むことになるので、ちょうどダムが決壊するように、氷床から海洋に水が供給される。そしてその分、確実に海水準が上昇することになる。もし万一、南極氷床が完全に融解してしまった場合、世界の海面は60m上昇すると予測されている。海拔60mを関東平野で考えると、東京から西に向かうとJR中央線の三鷹駅が、北へ向かうと同じく宇都宮線の自治医大駅付近となるため、関東平野の大半は水没すると考えてよい。同じことが世界中で起こるため、世界中の大都市、そして平野部の農業生産地帯が失われることになる。もちろん、どんなに温暖化が進んだといえども氷床の完全融解には100年どころではない長い時間がかかるであろうから、このような状況は遙かな未来の話であろう。しかし現実には、北半球の氷河、氷床の融解、そして南極大陸の一部である南極半島で進行している氷床の融解により、海面は少しずつ上昇しつつある。既にこれは、時間の問題なのだ。

東南極氷床と呼ばれる南極大陸氷床の主要な部分は極めて安定していて、温暖化が進んだとしてもほとんど融解しないのではないかという見解があった。実際に東南極に位置する昭和基地を訪れても、氷床が融解をはじめているという様子は全く感じら

れない。しかし近年の観測では、表向き変動の見えない東南極地域であっても、文字通り水面下では、着実に影響が及んでいることが分かってきている。問題は、地球温暖化の影響で、海水温度の上昇が進行していることにある。温かい海水が南極大陸氷床が海に張り出した部分、いわゆる棚氷の下に流れ込んでいて、棚氷を下面から溶かしているのである。とけて薄くなった棚氷は、やがて崩壊して流出する。棚氷という支えを失った中心部の氷床は海に流れ落ち、更にとけてゆく。この温かい海水による氷床の底面融解が、安定していると思われた東南極氷床を、じわじわと脅かしつつあるというのである。

更にもう一点、南極氷床の融解は、南極海の海洋構造に大きな変動をもたらすことが予想されている。それは、氷床が融けて海洋に供給される水が、淡水であることによる。淡水は海水よりも軽いから、融け水は海洋表面に広がることになる。もちろん時間をかけて海水と混合してゆくであろうが、海洋表面に一時的にでも広がった淡水は、海洋に対する蓋の役割を果たすこととなる。これにより、南極海の海水循環、物質循環はこれまでと全く異なるものになるであろう。はたしてこれは、地球環境にどのような影響をもたらすのであろうか。

## 6. 終わりに

南極観測は、すでに60年を超える歴史を持っている。最近では、「まだやってるの?」といわれることも多い南極観測であるが、実は人間活動の、さらには地球環境の未来を左右する鍵となる新しい発見や重要な分析が、日々積み重ねられていることを知っておいて欲しい。南極を知る事、また南極から知る事は、人類の未来に直接繋がっているのである。

## 著者略歴



伊村 智 (イムラ サトシ)

1991年3月 広島大学大学院博士課程後期 単位取得の上退学

1992年10月より国立極地研究所。第36次越冬隊、42次夏隊、45次越冬隊、49次夏隊長、アメリカ隊、イタリア隊、ベルギー隊など、多数の南極観測参加経験を持つ。