

# 探検博物誌への招待

神田啓史

総合研究大学院大学極地科学専攻／国立極地研究所

厳寒、強風、貧栄養そして乾燥。そんな過酷な自然条件の下、息づく生物がいる。それらはいったいどこから来たのか、そしてどのように環境に適応しているのか。ここでは、南極のコケ植物を中心に、極限環境に生きる生物を通して、極地の探検博物誌の世界を紹介する。

## はじめに

1983年7月、南極氷床の中央部に位置するロシアのポストーク基地(南緯78° 28'、標高3400m)で地球上の最低気温-89.2℃が記録された。極低温、乾燥、強風、貧栄養などのさまざまな要因によって、南極は生命にとっての極限環境となっている。一般に極限環境としては、高温の温泉、暗黒の深海、高塩分濃度の湖、重金属に富んだ河川などがあげられ、人間を含む多くの生物にとって、生存に適していない環境を指すことが多い。しかしな



①南極昭和基地から約300Km離れた内陸の山地、やまと山脈での生物調査。ここには2種類の地衣類が存在するが、その他は微生物の世界である。

がら、生物によっては極限環境をうまく避ける戦略をとるもの、極限環境そのものが最適環境であるものなどがある。それでは、南極の極限環境にはどんな生き物が存在しているのであろうか。ここでは南極の陸上生物に焦点を当て、極限環境に生きる生命の探検博物誌なるものを紹介したい。(①)

## 南極植物相の特徴

1976年、米国マクマード基地近くの南極縦断山脈の岩塊から不思議な生物が報告された。一見して何でもない岩石であるが、よく観察すると表面に近い層には岩石内(cryptoendolithic)生物相といえるゾーンが発達し、おもに細菌類、藍藻類(シアノバクテリア)、藻類、固着地衣類などから構成されていた(②)。地衣類は生殖組織である子器だけを岩の表面に出して胞子散布を行い、菌糸(共生菌)の層と取り込まれた藻類(共生藻)は岩の中にあるという、岩石そのものが生き物のような生活を維持していた。その地衣類層の下部緑色部から分離された藻類は最初、地衣類の共生藻の一属*Trebouxia*として扱われたが、後の研究によって、緑藻類*Hemicloris antarctica*という新属、新種として記載された。本種は-20℃以上では培養が阻害され、急速な冷凍実験では-50℃でも生存が可能であるなど、典型的な好冷生物であった。さらに注目すべきことに、さまざまな岩石内生物を研究

していくうちに、緑藻類の3種、藍藻類の17種が未知の種であり、新種である可能性をもつことがわかった。この現象は新しい生物の生育環境(ハビタート)が発見されたことと、生物多様性の維持と種分化の上でもたいへん興味ある問題である。

ある地域に特有な科や属レベルの分類群、あるいは多くの固有種が認められた場合、進化の段階で何らかの環境が大きく影響していたと考えることができる。南極植物相の特徴として、南極には特有の固有種が多いのか、それとも世界に広域に分布する種が多いのかは、生物種によって異なり一概にはいえない。少なくとも南極の陸上生物については、構造が複雑に分化している種子植物やコケ植物(分類学上は「蘚苔類」というが、この文では「コケ植物」という語を用いる)では固有種が少ないということはいえる。南極に自生する2種の種子植物、ナンキョクミドリナデシコとナンキョクコメススキはともに「ナンキョク」という和名、あるいは種小名がついてはいるものの、実は2種とも熱帯に近い南米の低緯度地域から南極半島に向けてほぼ連続的に分布しているものである。

コケ植物においても同様に固有種は少なく、世界広汎種の占める割合は大きい。かつて、コケ植物で南極に特有な属が記載されたことがある。1847年に南極半島のコックバーン島で採集されたコケが

センボンゴケ科フタゴゴケ属 (*Didymodon*) の新種として報告され、後にその種に基づいて南極特産の新属、新種、スジフクレゴケ属スジフクレゴケ (*Sarconeurum glac-iale*) (❶) として記載された。今日では、本種は南極のほぼ全域から見つかっている (ただし、昭和基地周辺ではまだ見つかっていない)。本属は約70年も南極に特有なものと見なされていたのであるが、1975年、南米に広く分布しているものと同種であることがわかり、この時点で南極に特有な属はなくなってしまった。

このように、極地では新しい調査地から新種が記載される傾向がある。それは未知の環境だからというばかりではなく、過酷な環境では分類に必要な形質が著しく変化し、通常の形態をとっていないことにも起因する。多くの時間をかけて現地の状況を詳しく把握することと、形態にとらわれない手法、たとえば分子生物学的な系統解析による新たな分類学的処理が必要である。ちなみに、コックバーン島は南極の植物学史上重要である。すなわち、1843年、エレバス号、テラー号によって英国の南極探検隊として参加したフッカー (J. D. Hooker) は南極で植物を採取した最初の植物学者であり、その最初の採集地がコックバーン島であった。

### 湖底のコケ植物

海洋環境には豊富な生物が存在することから予想されるように、極限環境といえども湖沼の中の環境は穏やかであると考えられる。湖沼でコケ植物の採取が試みられたのはそれほど最近のことではない。1957年の国際地球観測年 (IGY) にすでに南極観測を始めていた旧ソ連の生物学者による報告が最初であり、それはクイーンメリーランド、バンガーヒルズの水深33~36mの湖底からのコケ試料の採取であった。このときはカサゴケ科ハリガネゴケ属 (*Bryum*) の1新種と1新変種が記載された。その5年後、クイーンモードランド、シルマヘル地域の水深32.3mの湖沼で、サナダゴケ科サナダゴケ属 (*Plagiothecium*) の新種が記載された。さら



❷ 米国マクマード基地近くの南極縦断山脈から得られた石英質の岩石中から、岩石内生物相が発見された。表面近くの黒っぽい部分は地衣類の菌糸 (共生菌) の層であり、その下部の緑色部は主に緑藻類からなる層である。ここから、新属、新種の生物が見つかった。

に20年たって、ピクトリアランド、ドライバレーのバンダ湖の水深31mでハリガネゴケ属の南極特産種が見つかった。

昭和基地周辺の湖沼については、1977年、第16次観測隊が基地から約30km南の露岩域スカルプスネスの湖沼群で、水深3~5mの比較的浅い湖からコケ植物を2種採集した。これは当時の生物越冬隊が釣り糸の先にフックを取り付けて湖の底をたぐった際に引っかかってきたコケの破片であった。採取された2種のうち1種はどうやら周辺に生育しているコケの水中型というべきものであるが、もう1種は虚弱な糸状の茎が束になったようなもので、周辺の陸上には見つからないものであった。葉は多様な形をとり、茎から出た仮根 (茎の表皮の細胞が変化したもので植物体を支える役目がある) に特殊な塊形の無性芽 (むかご) をつけていることが特徴であった。しかし、当時は同定に耐えられる試料ではなく、所属不明な幻のコケであった。

その後10年たって、この標本の再検討がなされた。本種は南極半島周辺にしは見つかっていないシッポゴケ科スキゴケ属 (*Dicranella*) に属し、限りなく新種に近いものとして報告された。新種として扱われなかったのには理由がある。あまりにも形態に特徴がないことと、水中での形態の変異が十分に解析できていな

いことであった。その5年後、筆者が南極に赴き、湖沼域の生物調査を行った結果、いくつかの湖沼に上述の2種が混在した状態で分布していることがわかった。実験室に持ち帰り、培養によって形質分析を行った結果、無性芽をつけるほかに、雌雄同株である、葉が細長く先端に鋸歯をもつ、葉身細胞が長い、さらに染色体数が  $n=22+m$  である、などの特徴が判明した。

これらの形質はどうやらスキゴケ属というよりはカサゴケ科ナシゴケ属ナシゴケ (*Leptobryum pyriforme*) に近いものようであった。ナシゴケの和名は胞子囊の形が洋ナシに似ていることに由来しているが、南極の湖沼中のものには胞子体がまったくつかない。国際的な意見交換、標本交換の結果、どうやら本種の起源は南米アンデスの高山域に及ぶらしいことがわかってきた。ナシゴケ属は世界で5種類ほど記載されているが、まだ分類はよくわかっていない。そのうち1種は世界広汎種で日本にも普通に見られるが、他の4種は南米に集中しており、胞子体の特徴から *Wollnya* という属名で記載されているものである。最新の情報では、どうやら昭和基地の近くで見つかった水中のコケは南米のものと同じし、それらはメキシコからボリビア、エクアドル、ペルー、チリ、アルゼンチンのほか、最近、



③ 蘚類の一種スジフレゴケ。スジフレゴケは約70年間、南極に特有な属として考えられていたが、現在では南米に共通種が確認されている。オーストラリアのデービス基地周辺にて。

南アフリカでも見つかっている。

#### コケ坊主の発見と湖沼環境

1994～95年、上述のコケが採取されたスカルプスネスにおいて、第36次生物越冬隊員が比較的浅い淡水湖底一面に乱立する奇妙な構造物を発見した。これは直

径約40cm、高さ60cm以上になる円柱状あるいは塔状の底生植物群落であり、おもにコケ植物から成り立つことから俗に「コケ坊主」(moss pillar)といわれている(④)。潜水によりほぼ完全な形のコケ坊主を採取することに成功し、日本に持ち帰ってその構造物の研究を始めた。



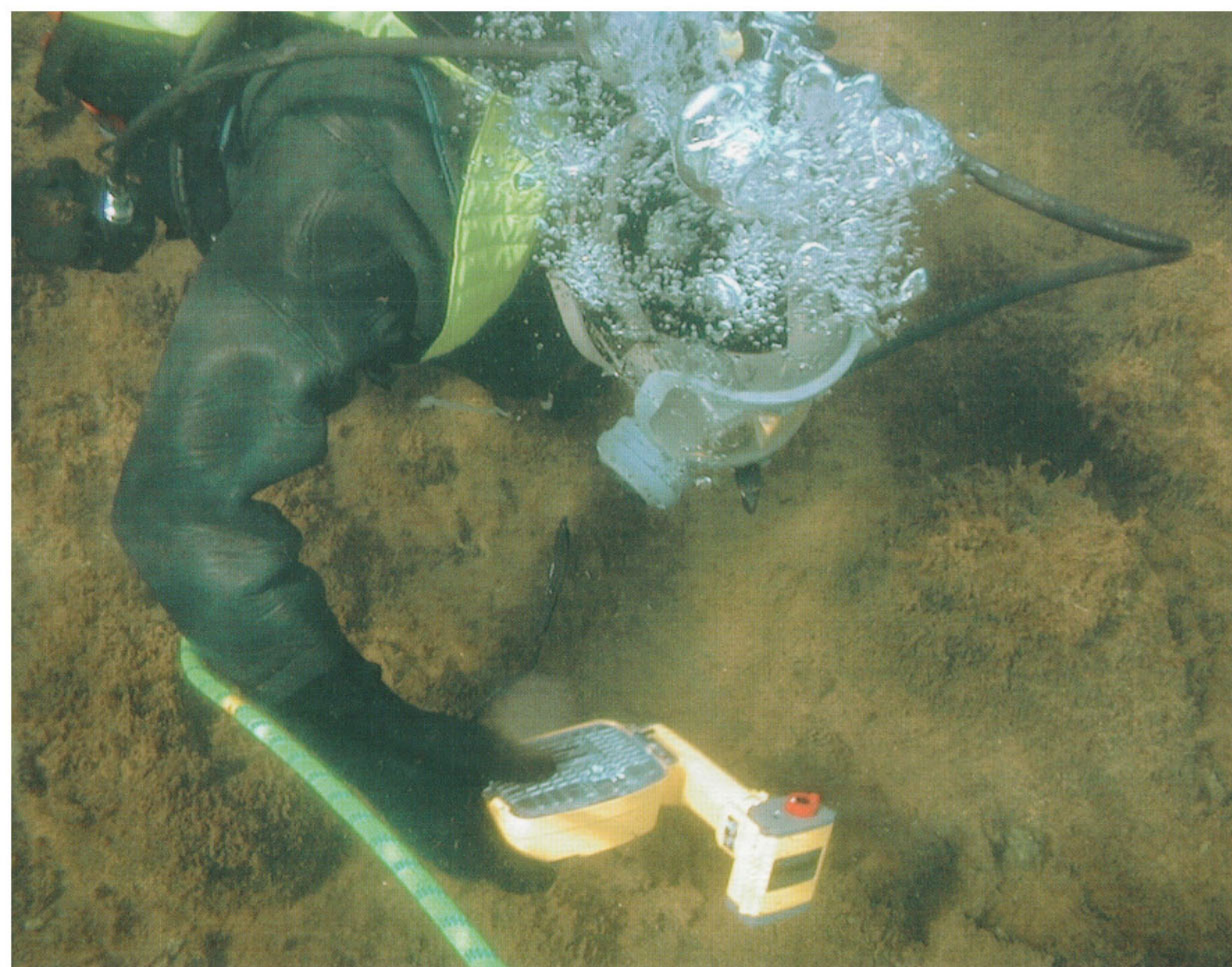
④ 昭和基地から約30Km南にあるスカルプスネス露岩域の淡水湖沼の底で発見されたコケ坊主。奇妙な構造物を作り上げるこのコケは、南米の高山域に分布するものと同一種であると考えられている。

断面を切ってみると、2種類のコケ植物の茎と葉は仮根と無性芽とが絡み合っており、硬くなるほど密に詰まった構造をしており、中心部は空洞に近いものであった。断面にはしばしば白っぽい層状構造が見られた。この層には細粒子の土壌の堆積と、数種の藍藻類、緑藻類や珪藻類が確認された。おそらく、何らかの原因で周囲の土壌を伴った雪解け水が湖に流入し、コケ坊主に堆積し、植物の生長に伴って層状になったものと思われる。一部20cmほどの破片の年代測定を試みると約300年はあった。さまざまな科学的な意義をもつこのコケ坊主発見の発端となったのは、実に20年前、釣り糸に取り付けたフックに引っかかってきた湖底の幻のコケであった。

コケ坊主が発見された湖沼は比較的浅い水深2～3mの湖沼であった。1年を通して湖底まで結氷しない水が存在するため、周囲の陸上とはまったく異なる温和な環境が成立している。また、この地域の湖沼は、夏期には少なくとも湖面の一部が融解して解放水面となるため、明確な1年周期の変動を示すと考えられる。湖底の水温は夏期には10℃を超え、極夜期にも4℃を保っていた。この地域では積雪が少ないため、水中照度も10月～4月にかけては光合成に十分な太陽光が透過する。水面は氷から解放される期間は盛夏の短期間であり、ブリザードなどの強風によって湖水が攪乱されることもほとんどない。半年間にわたり暗黒下におかれる点と、極端な貧栄養である点を除けば、湖底はきわめて安定した環境であり、周囲の陸上環境に比べても穏やかで生育可能期間が長いものと予想される(⑤)。

#### 南極植物分布論

南極のコケ植物には固有種が少なく、大半は世界に広く分布する広汎種である。ここでは南極におけるコケ植物の分布の起源に関する諸説を紹介しよう。まず、レフュジア(環境変化などにより、絶滅から逃れて頑強な種が生き残ることができた地域を指すが、とくに氷河期において氷河の影響を避けて生物が残存できた山岳域などをヌナタクという)で説



⑤潜水による湖沼調査。コケ坊主が見つかった湖沼の底全体が、主に藍藻類からなる藻類マットで被われている。

明する考えがある。この説はコケ植物が耐寒性に優れ、乾燥に強いことで裏付けられるかもしれない。それに対して氷河期後に他の島や大陸などから気流を介して移入し、定着したという考えがある。

また、南極のコケ群落の表面がじゅうたん状になることから、さまざまな繁殖体在那里に捕捉されている可能性がある。この考えに基づいて分析した結果、南極半島や海洋性南極の植生は南米と亜南極から長距離輸送によりもたらされるが、昭和基地などの大陸性南極はレフュジアが関与したと考える研究者もいる。さらに興味深いこととして、コケ植物の胞子を入れた容器を航空機の腹部に取り

付けて飛行実験を行い、その胞子の発芽実験によって、種の分布と胞子の乾燥・凍結に対する抵抗力がよく一致することを実証した研究者がいる。それによると、直径 $25\mu\text{m}$ 以下の小さなサイズの胞子は気流による長距離輸送が可能である、湿った生育環境からの胞子は乾燥に対する抵抗力が弱い、苔類（一般的にはゼニコケの仲間）は乾燥に対する抵抗力が弱いが蘚類（スギコケの仲間）は強い、などの傾向があるという。ただし、蘚類の場合でも茎が匍匐するタイプは直立するタイプに比べて抵抗力が弱いようだ。これらの考えに対して、現生のコケ植物であってもその分布の起源は Gondwana 大陸などの

プレートテクトニクス説で説明がつくという考えまで出ている。

さて、昭和基地周辺のコケ植物の起源はどのように考えるべきであろうか、レフュジアや長距離輸送で説明がつくのだろうか、あるいはプレートテクトニクスにも関連するのであるだろうか。これを議論するには、より詳細な試料、データの収集が必要であるが、ここでも遺伝子情報を得ることが分布の起源を明らかにする上で鍵になるかもしれない。

#### 氷床生物と氷床下湖

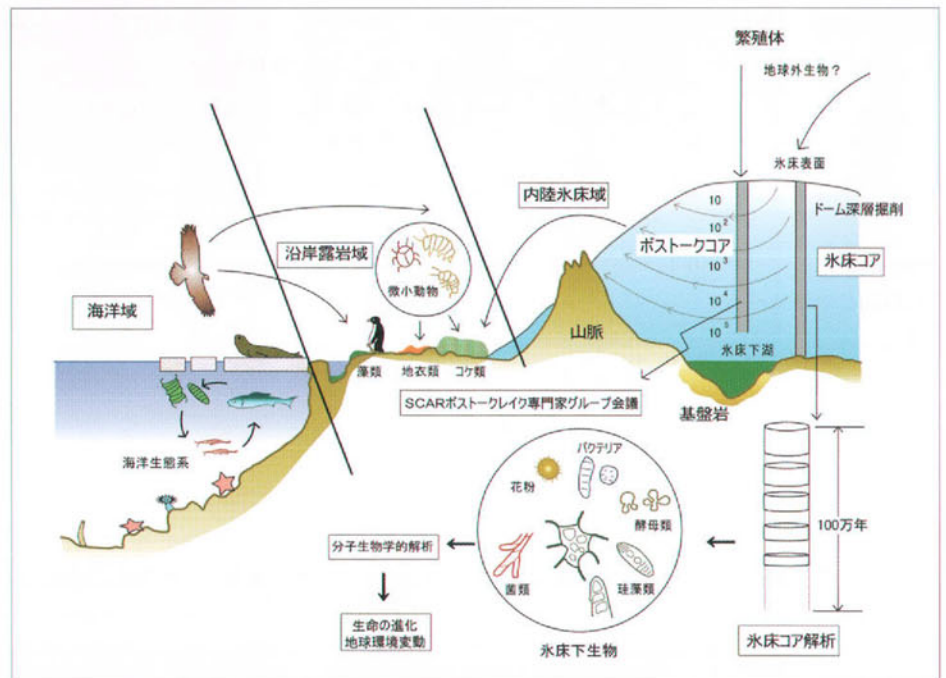
南極大陸の氷床での微生物の研究は、1933～35年の第2回バード南極観測隊が



⑥ 氷河と露岩の風上側にできた溝。広大な氷床に降り注ぐ生物の繁殖体は、南極の露岩域における生物群集の形成に深く関与している。溝に見られる層状構造は過去の気候の歴史を刻んでいると考えられる。昭和基地周辺のラングホブデにて。

人類の未踏地である氷床上から細菌を検出したのが最初のものである。今日では、地球の過去の気候変動を明らかにしようとする諸外国による氷床掘削が進み、微生物の研究も新しい局面を迎えている。南極の氷床は文明圏から遠く隔絶されている上に、安定した低温環境にあり、過去の年代を保証する層状構造が保たれていることから、生物の分布の起源を研究する上で理想的な状況にある。日本のドームふじ観測基地でも1996年に、2503.52mの深層掘削に成功し、過去32万年の気候変動を復元することができた。まもなく、新たな掘削を展開する計画である⑦。

一方、ロシアのポストーク基地では、すでに3623mまで掘削に成功している。ここで重要なのは、ロシアの研究者が掘削初期の1975年頃から氷床コアより多くの微生物を抽出し、研究してきたことである。これまでに細菌、放線菌、酵母、



⑦ 南極陸上生物学の基礎研究課題は、生物の侵入と定着の様式を理解することである。南極に生物が侵入する過程は、内陸氷床域に蓄積された生物の繁殖体に負うところが大きいと考えられる。長い年月をかけて露岩域での定着に成功した陸上生物は、海辺からの風や海鳥などによって運ばれる栄養源を利用することができる。ここでは海の影響を受けた生態系が成り立つ。

神田啓史（かんだ・ひろし）

専門は植物分類学。北極や高山域に分布の中心をもつ蘚苔類（コケ植物）の分類を手がけていたが、南極に関わってからは極地など厳寒地での植物の生態学的研究に携わる。現在、日本蘚苔類学会会長を務め、若手研究者の育成、コケ学の普及に尽力している。古くから植物のデータバンク作成に興味をもち、現在では遺伝研などと共同して、画像データベースの構築にも関わっている。



単細胞藻類、珪藻、孢子、花粉などが見つかっている。たとえば85m深（約2200年前）の氷床コアからは新種の *Nocardiopsis antarcticus* が記載された。さらに氷床中には予想を超える多量の微生物が見つかっている。氷床コア1cm<sup>3</sup>あたりで10<sup>7</sup>~10<sup>8</sup>個の細胞が存在するという。過去の地球環境との対応では、酸素同位体から推測して、過去14~18万年頃の氷期では大気中のダストが増加し、それに応じて微生物も増加したと考えられる。さらに氷床層が深くなればなるほど生きた微生物は少なくなり、孢子形成細菌が多くなる傾向にあった。

現在までに、氷床上からの人工地震やレーダー探査によって、ポストーク基地周辺には厚さ3800~4000mの氷床と岩盤との間に幅50km、長さ230kmの氷床下湖（subglacial lake）の存在が確認されている。すでに45年前の国際地球観測年の頃、英国隊がレーダー探査によって最初に氷床下湖を発見して以来、いくつもの氷床下湖の存在が予測されていたが、いま、その予測が現実のものになろうとしている。

ポストーク基地においてはまもなく氷床下湖の湖水あるいは湖底堆積物の採取が行われるものと思われる<sup>(7)</sup>。いまのところ、この湖に生物がいないという証拠は見つかっていない。おそらく過去

100万年前からの生物の存在が確認でき、そこは地球外生物の生育環境のモデルになるのかもしれない。しかしながら、試料の採取は汚染をひき起こすケースが十分あり、慎重に掘削を開始する計画だということである。

南極陸上生物学の基本研究課題の1つに、生物の侵入と定着の様式を理解することがある。微生物、あるいは孢子、花粉など南極氷床に降り注ぐ生物体へのアプローチによって、露岩域に広がる生物群集がどこから由来したのかという課題を解く糸口がつかめるかもしれない。露岩域は南極全域の5%にすぎず、南極大陸の95%は無生物の世界といわれてきたが、氷床が南極に堆積した過去100万年の時間軸と日本の37倍の面積に降り注いだ膨大な生物の繁殖体が、今日の南極の露岩域における生物群集の形成に深く関与していることは疑いない事実である。南極氷床にまつわる生物多様性の潜在性、可能性は計り知れない。

#### おわりに

ここでは極限環境に生きる生物を通して、極地の探検博物誌なるものを紹介してきた。南極に赴いて調査、採集する専門家は非常に少なく、地域のフローラを把握するのは容易ではない。極地科学研究では1回きりの調査がほとんどで、5年、

10年、あるいはそれ以上の間隔をおいて得られた試料を研究し、データをつなぎ合わせるのが常である。その意味でも南極から得られた試料は貴重であり、十分に尽くされた整理、保管によって多くの研究者に研究の機会を提供できる体制づくりが重要である。

総研大で生命科学を志向している専攻には、生命科学研究科の3つの専攻と、先導科学研究科の生命体科学専攻があるが、数物科学研究科でも極域科学専攻、統計数理学専攻などがある。極域科学専攻は大きく極域気圏科学、極域水陸圏科学の2つの分野に分けられ、それぞれがさらに電離圏と大気圏、水圏と陸圏の2つの分野に分けられている。後者のそれぞれで海洋生物学、陸上生物学が扱われている。地球システムとしての大気、雪氷、海洋と生物の相互作用は本専攻では重要な課題である。極域科学において生物学を学ぶことは、極地から地球を見、また宇宙を見ることでもある。

ここに書いた内容の一部は、総研大の共同研究「極限環境下の生命—適応の分子機構」（1996~99年 代表者 神田啓史）による。本共同研究は極域科学専攻、分子生物機構論専攻、遺伝学専攻、生命体科学専攻、および他大学の研究者が参加したものである。