

極地微生物の生存戦略

福田 青郎・今中 忠行*

はじめに

極地とはいわゆる南極・北極地域のことを意味する言葉である。これら地域はとても気温の低い地域であり、特に南極は北極よりも気温が平均で20℃ほど低い。気温は一般的に内陸で高高度の場所の方が低くなるが、北極には南極と異なり“大陸”がないため、南極の方がより気温は低くなるのである。この南極地域は地球上でもっとも寒冷な地域であり、日常的に氷点下の風が吹いている。寒冷とは言ってもその気温は場所によっても大きく異なり、年平均気温は海岸沿いで-5℃から-15℃、そして内陸の標高が高い場所では-55℃を下回る¹⁾。このような寒冷な環境は生物が生きるには過酷な環境であるが、実際にはそこには多くの微生物が存在している。本稿では南極を中心に、そこに生きる微生物の探索とその性質について紹介をしていきたい。

南極の気候

前述の通り南極は地球上でもっとも寒冷な地域である。過去に観測された南極における（当然ながら地球上における）最低気温は、ロシア・ボストーク基地で1983年に観測された-89℃であり、これは我々の研究室で微生物サンプルの長期保存に使用するディーブフリーザーの温度（-80℃）を下回る。また気温ではなく地表面温度ではあるが、-93℃という低温も南極で記録されている。また逆に南極の最高気温としては、アルゼンチン・エスペランサ基地で17.5℃（2015年3月24日）が観測されている。それでも年平均気温は氷点下であり、決して温かい環境ではない。南極はこのようにきわめて低温環境であるため、一部に地面が露出している地域（露岩地域）も存在はするが、その地表の大部分は氷雪に覆われている。さらに空から降ってくるものは、“雨”ではなく“雪”である。つまり南極地域では生物が生きていく上で必須である液体の水がほとんど存在せず、乾燥した環境であるといえる。このような環境であるため植生はほとんどなく、せいぜい地衣類が存在するくらいであり、いわゆる貧栄養環境となる。また一般には高緯度の地域は太陽からの光の照射量が少なくなるため紫外線が弱くなるが、南極の場合は春期から夏期にオゾンホー

ルが形成されるため、この地域は強度の紫外線に晒されることになる²⁾。上記のように南極地域は低温・乾燥・貧栄養・強力紫外線の照射など、多くの生物にとって生育が困難な環境であり、長らく人類の侵入を拒んできた。しかし南極の環境も一様ではなく、さまざまな生き物がそこに適応し生活している。南極に生息する生物としては、ペンギンやアザラシなどごく限られた動物が有名であるが、それ以外にも南極の湖をはじめ、永久凍土層、南極海、氷雪などさまざまな場所から微生物が発見されている^{3,4)}。たとえばボストーク湖の水コアよりさまざまな微生物が見つかったり、マクマードドライバレーの水に覆われた湖ではシアノバクテリアを含む微生物群が見つかったり^{4,5)}。またフリュクセル湖ではメタン生成菌が見つかったり⁶⁾。また岩石中で共生している微生物も見つかっている⁷⁾。夏期の太陽光を浴びることで石内の温度が10℃付近まで上昇し、また水分が保持されやすいことから、石の中で共生することは一つの生存戦略であるといえる。他にも氷上の粒子状物質（クリオコナイト）が夏期の太陽光を吸収し、その熱で底部を融かして円柱状の水たまり（クリオコナイトホール）を形成する事がある。このようなクリオコナイトホール中に微生物が存在することも知られている⁸⁾。また詳細は後述するが、南極の露岩地域にある淡水湖の湖底では、水生のコケ類・藻類が繁茂しており、“コケ坊主”という構造物も形成されている（図1A）。このように南極には見た目以上にさまざまな生物が存在する。

南極微生物の探索

南極地域は人類の影響がもっとも少ない原生地域であるため、この貴重な自然を守りつつ科学調査を行う事は、地球環境を理解するために重要なことである。科学的調査の自由と国際協力の促進や軍事利用の禁止、南極地域における領土権主張の凍結を定めた南極条約が1959年に採択され、2013年2月現在で締約国数は50国になった⁹⁾。これら締約国の中には南極の一部に領土権を主張する国もあるが、日本国は領土権を主張しないと同時に他国の主張も否認する方針である。このため、たとえば日本人が南極に行く際は、途中で南米などの外国に立ち寄る場合は別として、パスポートやビザは必要ない。ま

*著者紹介 立命館大学生命科学部（教授） E-mail: imanaka@sk.ritsumei.ac.jp

特 集

た、この南極地域では科学的研究活動を目的として30か国以上が観測基地を設けている。日本も東オングル島に建設された昭和基地を拠点として、1957年より基本的に毎年、南極地域における天文・気象・地質・生物学の観測を行っている¹⁰⁾。筆者は第46次南極地域観測隊夏隊に参加し、南極海、露岩地域の土壌、各種湖沼（淡水湖、低塩湖、中塩湖、高塩湖）の水・堆積物など約260種類の試料を採取した（図1）¹¹⁾。これらのサンプルから、好冷菌・好塩菌・貧栄養菌・光合成菌・共生菌群などをキーワードとしてさまざまな生育パラメーターを検討し、新規微生物の探索を行った。その結果1000株を超える新規微生物の候補株を分離することができた。本稿ではこれら微生物のうち、特に興味深いものの一部を紹介したい。

湖沼群より単離された微生物

南極地域のほとんどが氷雪に覆われているが、南極大陸縁辺には部分的に地面が露出している地域も存在する。特に昭和基地の近くにはスカルプスネスやスカーレン、ラングホブデなど、さまざまな露岩地域が存在する¹²⁾。この湖沼は氷床が溶けてできた淡水湖もあれば、以前は海であったが現在では湖となった高塩湖もあり、その両者が混合した中塩湖・低塩湖も存在する。これらの湖は冬季には湖面が凍結するものの夏期には一部が融解し、ある程度の深さがあれば、湖底には1年中水の層があることになる¹³⁾。過去の調査によると、これら湖水自体は有機物濃度の低い貧栄養環境であり、プランクトンが少数いる程度である。しかしその一方で湖底にはコケ類・藻類が繁茂し、湖によっては80 cmにも達する構造体“コケ坊主”が存在している（図1A）¹²⁻¹⁴⁾。このように陸上に比べると湖底の生物量は多く、植生がない陸上とは対

象的である。

上述のスカルプスネスの湖沼群の底より藻類を含むサンプルが採取された。これらの内、淡水湖（長池）湖底サンプルより、栄養源の豊富な培地では生育できない貧栄養微生物（120-1株）が単離された¹⁵⁾。分離源の湖水は非常に有機物濃度が低く、このような環境で生きるために適応したと考えられる。また本菌は5°Cでも生育するが、その至適生育温度は南極ではありえない30°Cであり、環境中では緩やかに生育していると考えられる。本菌の形態の詳細を電子顕微鏡により観察した所、多数の突起が観察された（図2A）。この突起によって細胞同士がつながっているものも多く、バイオフィルムの形成や何らかの細胞間の相互作用に利用しているようにも見えるが、突起の役割は不明である。また本菌はカロテノイドに由来すると考えられる色素を生産するため、そのコロニーは赤色である。本菌の16S rRNA 遺伝子配列は、それまでに知られていた生物のものと相同性が低く（*Rhodobiaceae* 科の *Mesorhizobium* 属細菌および *Phyllobacterium* 属細菌と93%程度）、新分類群に属すると予想された。さまざまな解析の結果、本菌を *Rhodobiaceae* 科に属する新属・新種細菌 *Rhodoligotrophos appendicifer*（突起をもった赤い貧栄養微生物の意味）と名付けた¹⁵⁾。

同様にスカルプスネス地域にある淡水湖（通称たなご池）由来サンプルより、プロテアーゼ、アミラーゼ、エステラーゼ、リゾチームなどさまざまな分解酵素を生産する長桿菌（107-E2株）が単離された（図2B）¹⁶⁾。本菌の16S rRNA 遺伝子配列を解析した所、さまざまな分解酵素を生産する *Lysobacter* 属細菌であることが分かった（近縁種との相同性97%程度）。またさまざまな分解酵素生産に加え、本菌は定常期において暗褐色の色素（水

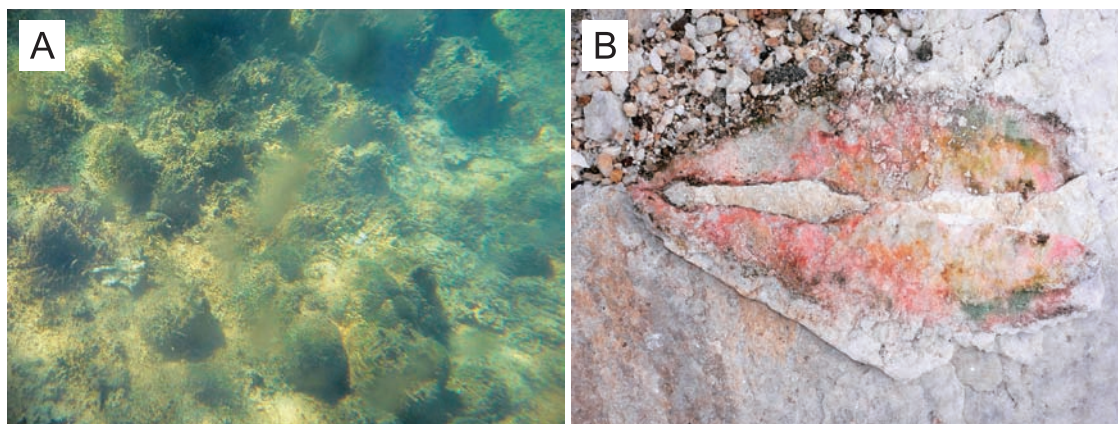


図1. 南極から得られたサンプル。(A) 南極の淡水湖。湖底にコケ坊主が形成されている。(B) 南極より採取された岩石。微生物群が存在し、内部が緑やピンク色になっている。

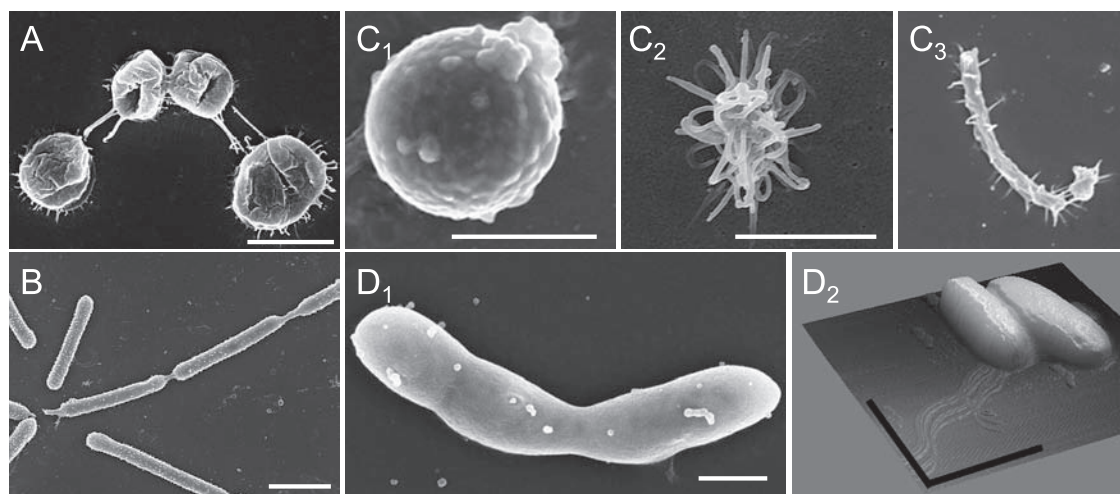


図2. 南極地域より単離された微生物たちの電子顕微鏡写真. (A) *Rhodoligotrophos appendicifer* のSEM写真. (B) *Lysobacter oligotrophicus* のSEM写真. (C) *Polymorphobacter multimanifer* のSEM写真 (C₁, 誘導期菌体; C₂, 定常期菌体; C₃, 固体培地上の菌体). (D) *Constrictibacter antarcticus* 262-8株 (D₁, SEM写真; D₂, AFM写真). SEM写真のスケールバーはすべて1 μm, AFM写真のスケールバーは2 μm.

溶性メラニン)を生産する¹⁷⁾. このメラニン合成量はUV照射でも増加するため、極地に降りそぐUVからの防御にも役立つと予想される. また興味深い事に本菌は至適生育温度こそ23°Cであるが、-5°Cという低温環境で固体培地上にコロニーを形成する. また本菌も *R. appendicifer* と同様、栄養源の豊富な培地では生育できず、南極湖沼という環境に適応していると考えられる. この貧栄養性を基に本菌を *Lysobacter* 属の新種細菌 *L. oligotrophicus* (貧栄養性の *Lysobacter* 属細菌の意味) と名付けた¹⁶⁾.

岩石中に生きる微生物たち

昭和基地の南に位置する露岩地域・スカーレン地域で、その隙間内部に緑やピンクなどのカラフルな色をした岩石が採取された(図1B). この岩石の色が付いた部分に存在する微生物を調べたところ、シアノバクテリアや窒素固定菌を含む微生物群が発見された. 岩石中では水分が保持されやすいため、このカラフルな岩石の隙間では微生物による共生系が構築され、乾燥などの南極の厳しい環境に耐えている事が予想された. さらにこの岩石からは、共生系での役割は不明だが、見た目にも分類学的にもかわった微生物が発見された.

カラフルな岩石から発見された細菌の一つが培養条件や生育段階依存的に形態が変化する細菌、262-7株である. 本菌は液体培地では誘導期に球菌であり、定常期にかけて徐々に突起物が形成されることがわかった(図2C₁, C₂). また本菌は固体培地で培養した場合、多数の突起物を有する長桿状菌体も観察された(図2C₃). 形

態変化を行う細菌や、突起をもつ細菌については過去に報告があるが、このような奇妙な触手を多数持つ細菌に関する報告はない. この突起は微生物が環境中で生きるために役立つと考えられ、表面積の肥大化やバイオフィーム形成促進などに関与するのではないかと予想はしているが、現在のところ、その役割理由は不明である. また本菌の16S rRNA 遺伝子配列を解析したところ、*Sandarakinorhabdus* 属細菌と95%程度の相同性を示した. その形態変化の性質などから、本菌を *Sphingomonadaceae* 科の新属・新種細菌 *Polymorphobacter multimanifer* (たくさんの手を持つ、多形の棒の意味) と名付けた¹⁸⁾.

カラフルな岩石からは、2週間の培養で直径2 mm以下というごく微小なコロニーしか形成しない細菌、262-8株も単離されている. 電子顕微鏡観察を行ったところ、細胞が枝豆状に連なっている様子が観察された(図2D₁). また原子間力顕微鏡により鞭毛の存在も確認された(図2D₂). 本菌は既知の菌との16S rRNA 遺伝子配列の相同性が非常に低かった(*Stella* 属細菌と相同性90%程度). 種々の解析の結果、本菌は *Rhodospirillales* 目に属する新属・新種の連鎖菌 *Constrictibacter antarcticus* (南極由来のくびれを持つ棒の意味) と名付けた¹⁹⁾. *C. antarcticus* 262-8株の16S rRNA 遺伝子配列について遺伝子のデータベースで検索すると、世界のさまざまな環境中に近縁の微生物がいることは分かるが、培養に成功したのは本菌が初めてである. この原因は、本菌の形成するコロニーが非常に小さいため、環境サンプルからの単離操作の際に見過ごされがちになるからではないかと思われる.

おわりに

南極地域は低温・乾燥・貧栄養環境に加えて強力な紫外線が降り注ぐなど、生物が生きていくのが困難な環境である。南極で生きるための環境の性質として、光合成のための光、物理的な安定性、UV耐性、水分活性、栄養源の有無の順に重要で、それらに比べると寒さをしのぐ事はさほど問題ではないと言われている²⁰⁾。今回は南極より単離された新属・新種細菌を紹介したが、南極岩からは光合成細菌や窒素固定菌が単離され、栄養源は確保されている。また岩石の隙間であれば物理的な安定性、UV耐性、水分活性は維持されるであろう。一方、南極湖から単離された微生物たちは藻類と共生していると考えられ、この環境もまた条件に適合している。このような環境が生命にとって有利だという事は、われわれが住むような“普通の世界”でも変わらない。一方、程度の差はあれ、多くの微生物たちが貧栄養性を示した。南極という有機物が少ない環境に適応しすぎた結果、有機物が多すぎると生育をやめてしまうという慎ましい生物たちである。もちろん現在解析中の細菌の中には、高い栄養濃度中で生育するものも見つかっており、南極の微生物が必ず貧栄養性を示すわけではないが、貧栄養菌の存在はそれだけ南極が貧栄養環境であることを反映しているのであろう。しかし貧栄養環境自体は、南極地域以外にも海洋の大部分などさまざまな場所が該当し、地球規模で見るとそう珍しくはない。我々からすると極地は寒さがとにかく目につき、確かに単離された微生物たちも“普通の環境”に生きる微生物よりも低い温度で生育する能力をもつ。しかし南極の生命にとっては寒さ対策以上に、生きやすい環境を見つけ、そこで足りない分を共生して補い合い、慎ましくとも生きていく事が大事な

だ。「環境ストレスに対する微生物応答と適応機構」というタイトルからはその生物の特殊性が強調されそうだが、極限環境に生きる生命も、本質的には我々と大同小異、大差ないのである。

文 献

- 1) Bargagli, R.: *Antarctic Ecosystems*, p. 1, Springer (2005).
- 2) Hughes, K. A. and Lawley, B.: *Environ. Microbiol.*, **5**, 555 (2003).
- 3) Tindall, B. J.: *Microb. Ecol.*, **47**, 271 (2004).
- 4) Prisco, G. D.: *Physiology and Biochemistry of Extremophiles*, p. 145, ASM Press (2007).
- 5) Prisco, J. C. et al.: *Science*, **280**, 2095 (1998).
- 6) Karr, E. A. et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **72**, 1663 (2006).
- 7) de la Torre, J. R. et al.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **69**, 3858 (2003).
- 8) Christner, B. C. et al.: *Extremophiles*, **7**, 177 (2003).
- 9) 外務省, 南極条約・環境保護に関する南極条約議定書: http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/s_pole.html
- 10) 西堀栄三郎: 南極越冬記, 岩波書店 (1958).
- 11) 今中忠行: 微生物と共生しよう, ケイディーネオブック (2006).
- 12) Imura, S. et al.: *Polar Biol.*, **22**, 137 (1999).
- 13) 伊村 智, 工藤 栄: 南極資料, **50**, 103 (2006).
- 14) 工藤 栄ら: 南極資料, **52**, 421 (2008).
- 15) Fukuda, W. et al.: *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **62**, 1945 (2012).
- 16) Fukuda, W. et al.: *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **63**, 3313 (2013).
- 17) Kimura, T. et al.: *J. Biosci. Bioeng.*, **58**, 120 (2015).
- 18) Fukuda, W. et al.: *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **64**, 2034 (2014).
- 19) Yamada, K. et al.: *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, **61**, 1973 (2011).
- 20) Cary, S. C. et al.: *Nat. Rev. Microbiol.*, **8**, 129 (2010).