

TOPICS

南極淡水湖沼における藻類群集の強光・紫外線に対する適応戦略

総合研究大学院大学複合科学研究科
極域科学専攻

田邊優貴子

はじめに

一般的な南極大陸のイメージ。それは雪と風が吹き荒れ薄暗く寒い、一年中厚い氷に閉ざされた生命を拒む大陸であろう。しかし、南緯 69 度、東経 39 度に位置する東南極昭和基地周辺には、この一般的イメージとは違った南極が存在する。氷床から解放され大陸岩盤が剥き出しとなった露岩域と呼ばれる地帯である (図 1)。これら露岩域は氷期-間氷期サイクルという地球規模の環境変動の影響を受け、数万年前に南極氷床が後退して形成された環境であり¹⁾、そこには多様な大きさ・形状・水質を持った湖沼が数多く点在している²⁾ (図 1)。この昭和基地周辺の露岩域における貧栄養な湖沼中で、ユニーク且つ豊かな植物群落 (藻類・コケ類を中心とした) が形成されていることが、近年の日本南極地域観測隊の活動により発見された (図 2)。これまでも南極の浅い貧栄養湖沼中には、時に数メートルにも及ぶ分厚い湖底藻類マットによる独特の生態系が築かれていることがよく知られてはいるが³⁻⁶⁾、他の南極地域においても昭和基地周辺のようにユニークな形態をした植物群落の例は未だに報告されていない。

南極の淡水湖沼生態系は一般的に貧栄養、低温であることに加え、光合成有効放射 (PAR) が年間を通して少ない^{7,8)}という、極めて生産性の低い環境である。夏には一日中光が降り注ぐ白夜が続く、冬には全く光の入射しない極夜が続く。その上、南極湖沼の多くは年間の内ほとんど、もしくは全ての期間にわたって氷に覆われているため、氷の厚さや状態の季節変動や積雪といった要因により湖水中の光環境が大きく影響を受ける^{9,10)}。こういった背景からも、湖沼中の光合成生物にとっては、光の得られる極めて短い期間こそが唯一の生育期と考えられている。ところで、高緯度に

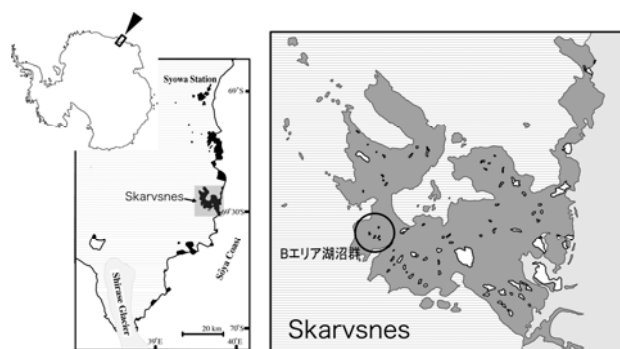


図 1 宗谷海岸とスカルプスネス露岩域および研究湖沼の地図



図 2 東南極 昭和基地周辺における湖沼中の湖底植物群落

なるほど夏季の日照時間が長く日射量の日積算量は大きくなる¹¹⁾。例えば、中緯度都市である東京 (35°40'N, 39°45'E) における日射量の日積算量が最大になる 5 月の平均値 16.1 MJ/m²/day (1972 年から 2000 年までの統計値, Japan Meteorology Agency, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>) と、昭和基地周辺露岩域 (69°20'S, 39°36'E) における 8 月の平均値 28.3 MJ/m²/day¹²⁾とを比較してみると、南極域での夏の一日の日射量が多いことがよく分かる。このように南極における夏は、光エネルギーを利用して生活できる季節であるのだが、藻類が光合成を行うに当たって強光・低温といった一般的なストレスが大きい時期でもある。

南極の湖沼から露岩域一帯に渡って優占しており、重要な一次生産者である藍藻群は、強光や近年の南極

域におけるオゾン層減少による強紫外線環境に対して強い耐性と適応能力を持っていると考えられる。カロテノイドやキサントフィル、紫外線防御物質である scytonemin^{13,14}、MAA(マイコスポリン様アミノ酸)¹⁶⁻¹⁹ は紫外線や強光を調節もしくは防御することにより、活性酸素による細胞の損傷や光合成活性の低下と成長阻害から保護する役割を持つことが知られている^{13,20-26}。本研究では、昭和基地周辺のユニークな湖底藻類群集形成と成功の謎に迫るべく、藻類群集の強光・強紫外線環境に対する防御と適応という観点から解明を目指した。

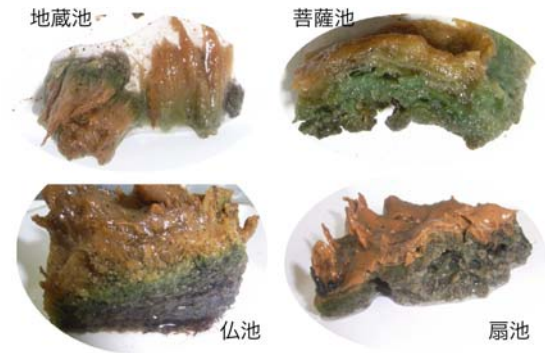


図3 各湖底藻類群集の形状

南極湖沼中の光環境と藻類群集の光に対する応答

昭和基地より南に約 40 km ほど離れたスカルプスネス露岩域 (69°20S, 39°36E) に位置する、近接したような環境の 4 つの浅い淡水湖沼 (地蔵池、菩薩池、仏池、扇池) で 2007 年 1 月に研究調査を行った (図 1)。各湖沼の最大水深は、地蔵池 : 3.1 m、菩薩池 : 3.0 m、仏池 : 3.0 m、扇池 : 2.7 m で、そこにはテクスチャーと形状が異なる藻類群集が繁茂していたが、それぞれ一様に表面はオレンジ色、その下層は黄緑色、さらに黒緑色へと続く、という色の共通性が見られた (図 3)。この色こそが、南極の強い光と紫外線が降り注ぐ環境下で生命活動を行うための鍵になるのではないかと推察し、①湖水中の光スペクトル (TriOS Optical Sensor)、②藻類群集の各層ごとに光-光合成曲線 (WALZ Water-PAM) の測定を行った。

測定の結果、湖面での太陽光強度と比較して、全ての湖底におよそ 50~70 % もの可視光が到達していた (図 4)。さらに扇池では非常に有害な UV-B (280-315 nm) 領域の光でさえ 40 % 近くも到達する環境であった (図 4)。以上のことから、南極の貧栄養湖沼はその清澄さと浅さ故に、水の中とはいえ強光・強紫外線環境であることが判明した。これら藻類の光-光合成を測定したところ、最大電子伝達速度 (ETRmax) は、全て低い値であったが、その中でも柔らかい構造をとる地蔵池と菩薩池の群集は比較的 ETR が高く、堅い構造の仏池と扇池の群集は低い値であった (図 5)。PAR を最大 470 mmol/m²/s まで上げると、全湖沼とも中層 (黄緑色) と下層群集 (黒緑色) で ETR に阻害が起きたが、オレンジ色をした表層群集はほとんどの湖沼で強光阻害を示さなかった。しかし、扇池の表層群集だけは PAR

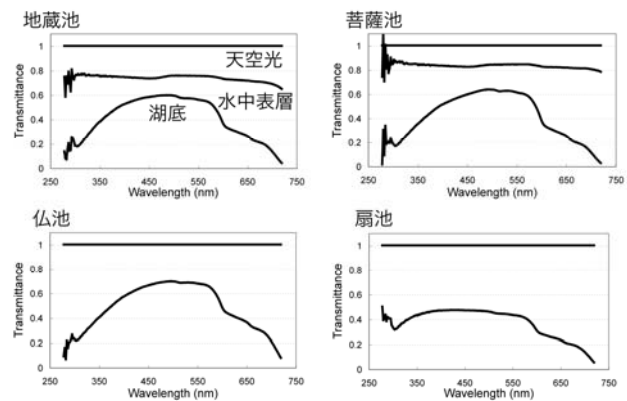


図4 各湖沼中における湖底への光スペクトル透過率

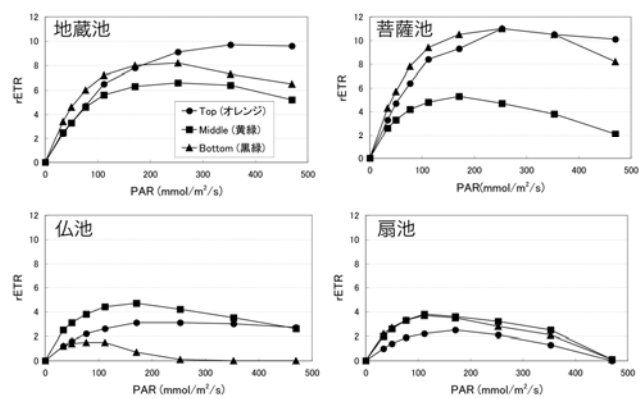


図5 各湖底藻類群集の各層毎の光-ETR 曲線

が 250 mmol/m²/s で ETR が低下した (図 5)。

光防御/制御物質から見た強光・紫外線に対する適応戦略

湖底藻類群集を表層から鉛直的に約 2~3 mm 毎に切断し、薄層状切片を作成した。各層に含まれる光合成色素 (クロロフィル)、光防御/制御色素 (カロテノ

イド、キサントフィル)、紫外線防御物質 (scytonemin、MAA) を抽出し、HPLC (高速液体クロマトグラフィー) もしくは分光光度計により分析を行った。その結果、全湖沼ともに MAA 含有量、クロロフィル a 量に対する scytonemin 量の比、同じくカロテノイド量の比は強光環境である表層群集で最も高い値であった (図 6 - 図 7)。可視光域が特に強い環境である仏池では、scytonemin、カロテノイド、キサントフィルの含有率が高かった (図 7)。このことから、湖底藻類群集はその表層で強光・紫外線に対して防御もしくは調節する機能を働かせることによって巧みに環境へ適応していることが推察された。扇池は紫外線がとりわけ強い環境であり、それに応答して MAA の含有量が多く (図 6)、さらにカロテノイドとキサントフィルがある程度の含有率である (図 7) にも関わらず強光阻害が起きている。これは、紫外線がビオラキサンチン脱エポキシ化酵素を阻害するために、可視光と紫外線が同時に強い場合には、キサントフィルサイクルによる光阻害の防御が行われなくなることが原因であるかも知れない²⁷⁾。

菩薩池では全層に渡って糸状藍藻 *Leptolyngbya perelegans* (図 8A) が優占種であったが、他の 3 湖沼では表層でのみ優占しており、下層では *Leptolyngbya tenuis* (図 8B) が優占種であった。いずれにおいてもこれら糸状藍藻が群集構造の骨格を形成しており、さらには光環境に依存して優占種に違いがあるのではないかと示唆された。他には菩薩池と仏池の中層で藍藻 *Nostoc sp.* (図 8C)、上層では緑藻 *Thorakochloris sp.* (図 8D)、扇池の下層では緑藻 *Kentrosphaera grandis* (図 8E) が優占していた。

おわりに

近接し、似たような環境の 4 湖沼において水中の光スペクトルと光-光合成曲線の測定、光合成色素と光防御/制御色素、紫外線防御物質の分析を行った。南極淡水湖沼はその清澄さと浅さ故に、可視光域が約 50%~70%も、紫外光域が約 40%も湖底に到達することが明らかとなった。一般的な陸水学や生物海洋学の教科書では、紫外線は水面に達した放射のうち約 50%が表面付近で散乱・吸収され、残りもその後水中で直ちに散乱・吸収されてしまうと解説されている^{11,28)}。今回研究対象とした湖沼でこれ程まで紫外線が

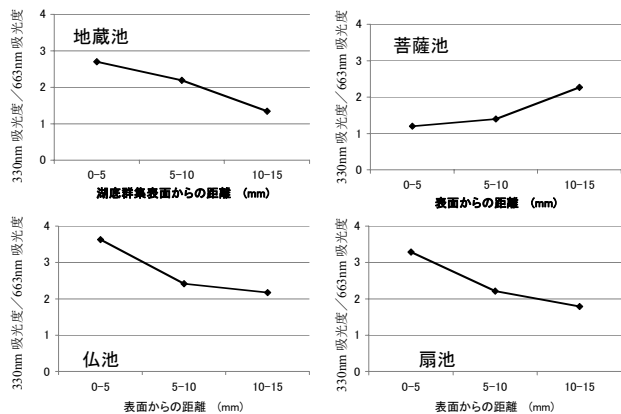


図 6 各湖底藻類群集中の MAA 含有量

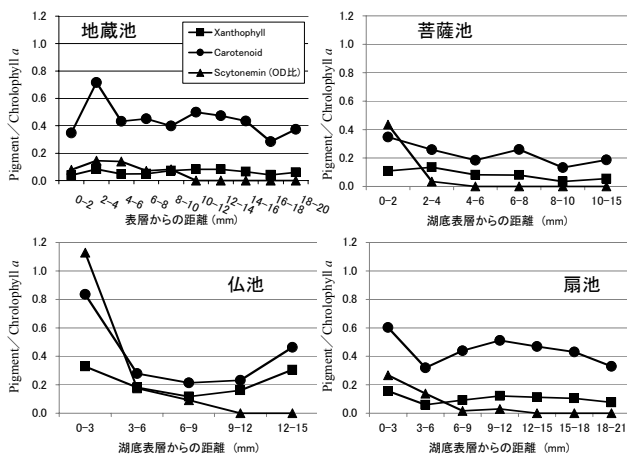


図 7 クロロフィル a に対するカロテノイド、キサントフィル、scytonemin の含有率透過率

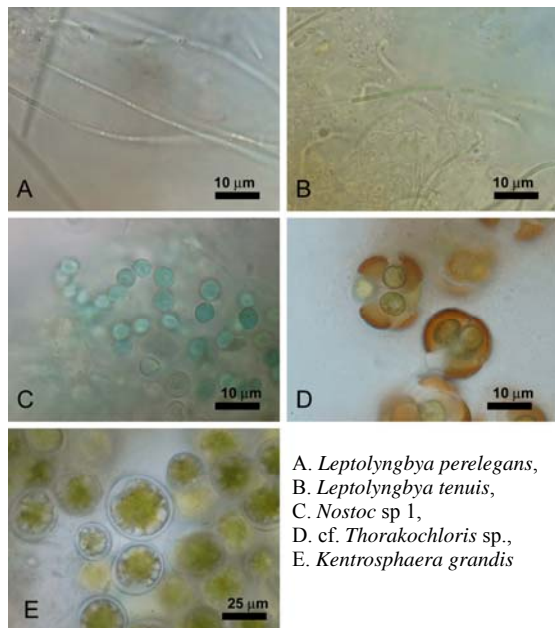


図 8 4 湖沼における湖底藻類群集中の優占種

透過する理由として、水中で紫外線を吸収すると言われる溶存有機物の含有量が極めて少ないため²⁹⁾ではないかと考えられる。

本研究のまとめとして、図9に概略図を示した。強光・強紫外線環境下で生息する群集は、光防御/制御色素や紫外線防御物質を多量に作り出すことによって、有害な光から身を守り生命活動を行っている。しかし、これら堅い群集は防御物質等を合成するのにコストが掛かる分 ETR が低い値であった。逆に、柔らかい群集では防御物質をあまり合成していないためか、比較的高い ETR となっていた。また、群集構造の骨格を形成している糸状藍藻の種が、強光環境である表層と弱光環境である下層で異なることから、光環境に応じて棲み分けがなされているのではないかと推測される。

南極の特殊な光環境の下、様々な種の藻類が集まって出来た湖底藻類群集。一見バラバラでありながらも混沌とした不思議な形の構造物ではあるが、色に規則性を見出し、光をテーマに研究を進めて来た。そこから見え始めた個々の光合成の多様さと、垣間見える群集全体としての生き方。流転する環境の中で生物の生き方は多様であるが、混沌とした個々がこの群集を形成し、まるで全体として何らかの秩序を持って生きている一つの生命体のように見えてならないのである。

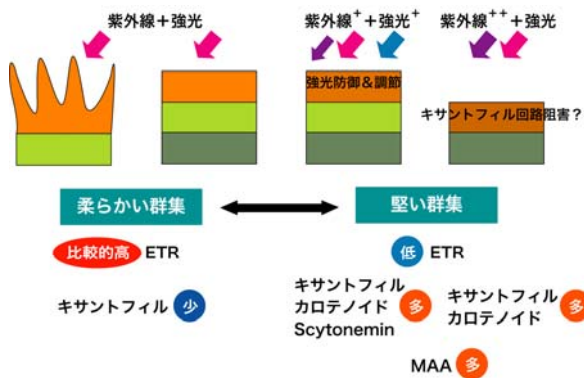


図9 光環境の違いによる藻類群集の適応戦略

参考文献

1. Miura, H., Maemoku, H., Igarashi, A., and Moriwaki, K. (1998) *Special map series of NIPR* 6.
 2. Imura, S., Bando, T., Seto, K., Ohtani, S., Kudoh, S., and Kanda, H. (2003) *Polar Bioscience* 16, 1.

3. Hodgson, D. A., Vyverman, W., Verleyen, E., Sabbe, K., Leavitt, P. R., Taton, A., Squier, A. H., and Keely, B. J. (2004) *Aquatic Microbial Ecology* 37, 247.
 4. Sabbe, K., Hodgson, D. A., Verleyen, E., Taton, A., Wilmotte, A., Vanhoutte, K., and Vyverman, W. (2004) *Freshwater Biology* 49, 296.
 5. Verleyen, E., Hodgson, D. A., Leavitt, P. R., Sabbe, K., and Vyverman, W. (2004) *Limnology and Oceanography* 49(5), 1528.
 6. Matsumoto, G. I., Komori, K., Enomoto, A., Imura, S., Takemura, T., Ohya, Y., and Kanda, H. (2006) *Polar Bioscience* 19, 51.
 7. Campbell, J. W., and Aarup, T. (1989) *LM* 34(8), 1490.
 8. Larcher, W. (2001) *Ökophysiologie der Pflanzen* 6. Auflage (Ulmer, E., Ed.) GmbH & Co., Springer, Stuttgart, Germany.
 9. Fritsen, C. H., and Priscu, J. C. (1999) *Limnology and Oceanography* 44(2), 447.
 10. Vincent, W. F., Rae, R., Laurion, I., Howard-Williams, C., and Priscu, J. C. (1998) *Limnology and Oceanography* 43(4), 618.
 11. Lalli, C. M., and Parsons, T. R. (1993) *Biological oceanography*, Elsevier Science, Oxford.
 12. Tanabe, Y., Kudoh, S., Imura, S., and Fukuchi, M. (2007) *Polar Biology online first*.
 13. Garcia-Pichel, F., and Castenholz, R. W. (1991) *Journal of Phycology* 27, 395.
 14. Proteau, P. J., Gerwick, W. H., Garcia-Pichel, F., and Castenholz, R. (1993) *Experientia* 49, 825.
 15. Karentz, D., McEuen, E. S., Land, M. C., and Dunlap, W. C. (1991) *Marine Biology* 108, 157.
 16. Bandaranayake, W. M. (1998) *Natural Product Reports* 159.
 17. Karsten, U., Franklin, L. A., Lüning, K., and Wiencke, C. (1998) *Planta* 205, 257.
 18. Karsten, U., Sawall, T., and Wiencke, C. (1998) *Phycological Research* 46, 271.
 19. Suh, H.-J., Lee, H.-W., and Jung, J. (2003) *Photochemistry and Photobiology* 78(2), 109.
 20. Gilmore, A. M. (1997) *Physiologia Plantarum* 99, 197.
 21. Demmig-Adams, B., and Adams, W.W. (2000) *Nature* 403, 371.

22. Vincent, W. F. (2000) *Cyanobacterial dominance in the polar regions*. In: *The ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space* (Whitton, B. A., and Potts, M., Eds.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
23. Misonou, T., Saitoh, J., Oshiba, S., Tokitomo, Y., Maegawa, M., Inoue, Y., Hori, H., and Sakurai, T. (2003) *Marine Biotechnology* 5, 194.
24. Squier, A. H., Hodgson, D. A., and Keely, B. J. (2004) *Org Geochemistry* 35, 1221.
25. Horton, P., Wentworth, M., and Ruban, A. (2005) *Federation of European Biochemical Societies Letters* 579, 4201.
26. Nishiyama, Y., Allakhverdiev, S. I., and Murata, N. (2006) *Biochimica et Biophysica Acta* 1757, 742.
27. Pfundel, E. E., Pan, R.-S., and Dilley, R.A. (1991) *Plant Physiology* 98, 1372.
28. Horne, A. J., and Goldman, C. R. (1994) *Limnology 2nd edition*, McGraw-Hill, Inc., New York.
29. Morris, D. P., Zagarese, H., Williamson, C. E., Balseiro, E. G., Hargreaves, B. R., Modenutti, B., Moeller, R., and Queimalinos, C. (1995) *Limnology and Oceanography* 40(8), 1381.