

氏 名 田邊 優貴子

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1239 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 極域科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 南極湖沼における藻類群集の光生理・生態学的研究

論文審査委員 主 査 教授 福地 光男
准教授 工藤 栄
准教授 伊村 智
教授 寺島 一郎（東京大学）
教授 大谷 修司（島根大学）
教授 菓子野 康浩（兵庫県立大学）

論文内容の要旨

昭和基地周辺の宗谷海岸縁辺には、氷床から解放され大陸岩盤が剥き出しとなった露岩域があり、そこには多様な湖沼が数多く点在している。これらの淡水湖沼は一般に貧栄養、低温であり、年間日射量が少ないため、低・中緯度域の湖沼に比べ生産性の低い生態系であるといわれてきた。にもかかわらずこれら湖沼には東南極における陸域生態系の中でも最も豊穡な植生、藻類・コケ類を中心としたマット状の植物群落が発達している。しかし、野外研究実施の困難さから、南極湖沼生態系の実態は捉え切れておらず、湖沼環境の詳細な季節変動性は未知で、その変動特徴とそれらが湖沼中の藻類に与えている影響の実態は不明であった。本研究は 1) 周年の南極湖沼環境の変動特徴を捉える、2) 湖底藻類の光合成特性と保持色素組成の応答を明らかにすることによって、南極大陸の中で繁栄を成し遂げた藻類群集の生存生長の原理を光生理・生態学観点から研究した。

3 つの貧栄養淡水湖沼を対象とし、水中の水温・PAR (photosynthetically active radiation)・chl a (chlorophyll a) の連続観測記録を解析した。全ての湖沼で湖中の光環境は地表到達光の大きな季節変動性に加え、湖水と積雪の有無によって大きく変動した。chl a は水中への僅かな入射光の下、晩秋と早春に増加していたが、早春に生じた光の急増によってしばしば停止・急減していた。そしてその濃度は年間で最も光エネルギーの高い真夏に最低となった。これらの原因は早春から真夏の南極の日射が紫外域のエネルギーも含め、藻類に深刻な障害を与え得るレベルであり、これらが光透過性の高い湖水中に入射したためと推察された。したがってこのことは藻類が生存し光合成活動により成長を遂げる上で、光防御/制御機構を持つ必要があることを示唆するものと考えた。

そこで強光・強紫外線が深刻な問題となりやすい浅い湖を対象とし、近接した 4 つの湖沼において、水中の光環境と、湖底の藻類群集の光合成、保持色素類に関する研究を進めた。水中の光波長特性とその光の湖底藻類群集内部への透過性の測定、PAM クロロフィル蛍光測定装置による群集の光合成特性の測定と HPLC (high performance liquid chromatography) による保持色素類の鉛直的な変化との関係を野外観測と試料分析を通じた解析を行った。

全湖沼ともに、湖水の消失していた夏には紫外線と PAR が地表の 20~70% のレベルで湖底まで到達し、湖底藻類群集がこれらに曝されていた。このためか、藻類群集表層において光合成の PS II (photosystem II) 最大量子収率および電子伝達速度は低く、強いストレス状態であった。群集表層はオレンジに呈色し、紫外線・強光防御物質であるカロテノイド・scytonemin・MAA (mycosporine-like amino acid) を高濃度で含有し、これらにより紫外域・可視短波長域が吸収され、群集表層を透過した内部の光環境は可視長波長域に富む弱いものとなっていた。

防御物質を高濃度に含有した表層群集の光合成は、光利用効率の低いものであったが、強光阻害は見られなかった。一方、群集内部は緑色を呈し chl a を多量に含み、相対的に弱光利用効率は高いものの、湖底に入射する程度の光照射を施した場合、阻害が生じることが明らかになった。さらに、湖沼間に生じていた僅かな光環境の違いは、強い UV-B と PAR 下に置かれた群集ほど紫外線・強光防御物質の高含有率をもたらし、その群集構造は堅く密なものであった。防御物質を多量に保持し密な構造をとることは群集表面で過剰な

光と紫外線の防御にとって有効だが、光の利用効率や最大光合成速度の指標 $rETR_{max}$ (maximum $rETR$) は小さくなるというトレードオフ関係が認められた。

自然界で生じている光変動に対する藻類群集の光合成と保持色素類の応答特性の追求のため、典型的な貧栄養湖沼にて、湖氷消失前後2ヶ月間の水中の光変動と湖底藻類の光合成(色素)の応答特性を野外研究中心に繰り返し計測した。

1月中旬の湖氷消失により、水深約3mに入射する450nmの光は約6倍まで増加した。これに伴い藻類のPS II最大量子収率は大幅に低下したが、その後、強光環境が持続したにも関わらず、2月初旬には次第に回復を見せた。この最大量子収率の変化と同期するように全カロテノイドの含有率は、湖氷消失直後に2割程度減少したのち、再び2月までには増加し、結氷時と同程度となった。これら全カロテノイドのうち、結氷時の弱い光環境のもとでは光捕集機能を示すカロテノイドが相対的に大きく、光防御機能を持つカロテノイドの含有率は、解氷後の強光下で増加していた。この変化は、藻類群集が光の変動に伴い保持していたカロテノイド類の量のみならず主な機能をも変化させていたことを示唆する。つまり、(1)結氷期の弱光下での光捕集、(2)湖氷消失直後の強光下での光捕集の減少、(3)強光環境下での光防御、である。このようにして藻類群集は、大幅に変動する夏季の光環境下での生育を可能としていたと推察された。さらに、深い深度に生育していた群集(10mの湖底)に比べて強光環境である浅い群集(水深4mの湖底)は紫外線防御物質を保持しうる藍藻類が多く、また同一水深でも強光の持続に伴い藍藻類が増加していった。これらから、光変動に対して藻類群集が示した保持色素の量と組成の変化は、群集の優占藻類の変化をも含むことが示唆された。

自然群集が見せた光環境との応答特性の検証のため、結氷中に採集した藻類群集試料を密閉容器中で現場培養し、同一試料の光合成・色素類の変動を追跡した。その結果、光増加によって最大量子収率とカロテノイド相対含有率の低下は1日以内に生じ、強光下に群集を晒し続けた場合、1-8週間以内に最大量子収率の回復とカロテノイド類の量の増加と質的变化が生じることが確認された。強光時の光合成の急低下とその後の回復、および色素類の量と質的变化が優占群集の変化を伴った応答であったことは自然群集が湖底において見せていた応答性と同様なものであった。

全湖沼において群集表面の強いオレンジ色の呈色は紫外線防御物質とカロテノイドの相対含有率が高いことに起因していた。群集表層はこれまでの南極の越冬中の試料採集でもオレンジ色を示しているという報告から、藻類群集はこれらの防御色素類を年間通して保持していると推察された。これによって光合成効率を高め難くはなるが、積雪や湖氷の消失により突如入射する強光にも大きな障害を受けず生存できると考えられた。

本研究によって、藻類群集は南極湖沼の光環境に応じ、群集内における保持色素量の鉛直差に加え、色素類の光防御・光捕集・光制御という3つの機能の大きさを調整し、南極の湖底環境に調和した応答性を示している実態が捉えられた。藻類群集は、光エネルギーの容易に獲得可能だが強光・強紫外線環境という夏の短期間に、過剰な光の防御によって死滅を回避しながらも、可能な範囲の光エネルギーを利用することによって正の光合成を維持でき、南極の湖底で大群落を築き上げていたと考えられた。

論文の審査結果の要旨

本論文に関する審査委員会を平成 20 年 12 月 26 日に開催した。本論文は南極の陸域・湖沼生態系中で普遍的に分布し、量的にも大きくなる基礎生産者である藻類に着目したものである。特に南極湖沼においてきわだったマット状の群集となる湖底藻類の環境応答性から、南極湖沼環境下での生存と繁栄の仕組みに迫ろうとしたものである。

これまで観測実施上の困難さから未解明であった南極湖沼環境の変動特徴を、近年、日本南極観測隊の活動努力によって取得され始めた係留式自動観測機器による観測データを整理・解析、さらには、自らも観測隊へ同行し、この研究解明のための主対象湖沼でのこれら観測機器の設置・回収にも携わった。結氷と解氷を繰り返す複数の南極湖沼の周年にわたる連続観測記録を纏め湖沼間で比較することで、環境変動幅とその周期性、湖沼の循環特性、さらには水中の浮游藻類群集の変動実態を世界に先駆けて捉え報告した。これによると浮游藻類群集は結氷下の低温・弱光条件のもと、晩春と早春に増殖ピークを持ち、比較的温暖で日射エネルギーを豊富に享受できる夏季には一年でもっとも生物量的に小さなものとなっていること、さらには、晩春の増殖は結氷下の湖水中への積雪の飛散消失に伴う突然の光の入射で停止し、急激な減少へと導かれることが観測した湖沼すべてにおいて生じている実態を捉えている。一般に貧栄養で低温環境では光合成において光エネルギー過多が生じやすく、これは光合成生物にとって光ストレス状態になる。南極湖沼環境はこの意味において藻類群集の光合成活動の上では強光ストレスを回避・軽減しながら生育していかなければならない場と考えられた。

湖底において数メートルにも達するマット状群集を築き上げている藻類はこの光ストレスをいかに回避・軽減し繁栄してきたのかという問題に対し、強光環境がより問題になると考えられた浅い 4 湖沼を対象として、光環境の詳細な観測と光合成応答、藻類の光吸収特性と保持色素の関係を現場での観測、実験、および試料分析を通じた研究を進めた。これらにより、もっとも光が強い解氷後の夏季において、光が地表到達量の半分以上、さらには生物に障害を与えうるレベルの紫外線までもが湖底に到達している実態、藻類マット表層では紫外線防御物質や強光防御と修復機能をもつカロテノイドを多量に保持しながら、光合成の効率を低下させながらも正の光合成を営む能力を発揮していることを捉えた。さらには、湖氷の消失に伴う光環境のダイナミックな変動が期待される夏季の 2 ヶ月弱にわたる頻繁な観測とサンプリングを通じ、光環境の変動実態とそれに応じ防御や光の捕集能力を馴化させるように応答しながら生育している藻類群集の実態を捉えた。この現象を南極湖沼での現場実験の企画と実現を通じて検証を重ね、これらに基づいて湖沼環境での成長と生存原理を考察、学位論文を纏め上げている。

以上の結果は、南極湖沼の環境変動特性をはじめ、その環境特性でもっとも重要な特性のひとつの光環境特性のもと、南極湖沼において普遍的に繁栄を可能としている藻類群集の生存戦略の実態に迫ったものと、きわめて高く評価されるものである。これらから、審査委員会では全員一致で提出された論文が学位論文に値するものと判定した。