

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 31 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2014～2016

課題番号：26310213

研究課題名 (和文) 南極湖沼生態系からつなげる生命現象と理論

研究課題名 (英文) Linking life phenomena to theoretical study from Antarctic lake ecosystem

研究代表者

田邊 優貴子 (Tanabe, Yukiko)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：40550752

交付決定額 (研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000 円

研究成果の概要 (和文)：南極湖沼環境データと湖底生物群集試料を解析したデータに基づき、以下～の数理モデル化を進めた。

「光化学系応答のモデル化」光合成生物の光合成反応中心を3状態モデルで記述し、光光波長に応じた光利用の最適戦略を求めることで、光合成生物の応答メカニズムを理論的に説明した。「群集の鉛直構造構築プロセスのモデル化」鉛直的な空間構造の下で光合成生物の生産性を求め、群集の鉛直構造が形成されるプロセスをモデル化した。「色素の鉛直パターン形成のモデル化」実際の湖底に入射する光スペクトルに対して、実際の光合成生物が持つ色素の鉛直構造が形成されるプロセスをモデル化した。

研究成果の概要 (英文)：The following mathematical models 1)-3) were represented based on data analyzed environmental parameters and benthic community samples in Antarctic lakes.

1) "Modeling photo-chemical reaction": Photosynthetic reaction center of photo-trophs was represented as three-state model, and optimum strategy of light utility was evaluated responding to light wavelength, then the response mechanism of photo-trophs was explained theoretically. 2) "Modeling developing process of vertical community structure": Productivity of photo-trophs was evaluated under vertical-space structure, and the formation process of vertical community structure was modeled. 3) "Modeling formation process of vertical pigment pattern": The formation process of vertical pigment pattern which the actual photo-trophs possesses was modeled by responding to incident light spectra to the actual lakebeds.

研究分野：水圏生態学、陸水学

キーワード：数理生物 光合成 群集構造 空間パターン形成 光スペクトル 進化動態 水圏生態系

### 1. 研究開始当初の背景

南極大陸には氷床から岩盤が露出した露岩域が大陸面積の約 2~3%存在する。昭和基地周辺の露岩域上にはサイズの異なる湖沼が 100 以上も点在し、最終氷期のあとに氷床が後退して誕生した生態系である。これら湖沼群のほとんどは貧栄養湖であり、水中には森林か草原のような独特の形態をした、光合成生物群集（シアノバクテリア・藻類・コケ類優占）から成る構造物が湖底空間にパターン形成されている。世界各国の他の南極地域において、厚さ数メートルにも及ぶ湖底シアノバクテリアマットが存在することは知られているが、昭和基地周辺のようなコケ・藻類・シアノバクテリアによる共存体は未だに発見されていない。

氷床から露出して誕生した初期の南極の湖沼生態系は、無生物環境であった。その後、約 1~2 万年という時間をかけて、徐々に生物が侵入し、現在のユニークな群集形態が形成された。近接した湖沼群は、同一の時間をかけ、同一の気候条件のもとで構築されたにもかかわらず、その多くは河川や集水域によって繋がったものがほとんどないために、湖ごとに異なる多様な群集形態・構造となっている。このことから、湖一つ一つが小宇宙のようなものであり、南極湖沼群は地球規模の実験場であると捉えることができる。南極の湖底に形成された光合成生物から成る集合体は、その中で生物個体の変動する環境に各々応答し、これらが集まることによってあたかも多細胞生物のように組織が機能分化し、湖それぞれに特有の群集を構築してきたと考えることもできる。また、水中には動物プランクトンはおろか、植物プランクトンもほとんど存在せず、目立った捕食者が不在の、極めてシンプルな生態系構造となっている。

申請者らはこれまでに、南極の湖底に鉛直的な色素パターン構造をとった光合成生物群集が層状に構築される現象、湖底という平面空間に円錐状の形態をとってパターン形成している現象をフィールドから発見してきた[1-2]（「研究計画・方法」の図 2 参照）。現場の光環境データ

と光合成応答データ、自然環境下での操作実験、試料の化学分析など、様々な手法によって、多種多様な光合成生物が入射する光スペクトルに光生理応答した結果として色素パターンが形成されるという仮説が立てられた。しかし、湖底生物群集の円錐形の形成メカニズムや、平面空間へのパターン形成メカニズムは全くわかっていない。また、色素の鉛直パターン形成についても、この現象と多様で複雑な環境要因との因果関係の連鎖をもっと明解にできれば、フィールドでの実測と実験・分析から得られたメカニズムの仮説をより一層論理的に説明できるはずである。

### 2. 研究の目的

南極湖沼という、ほぼ閉鎖系、かつ、シンプルでユニークな極限環境の生態系を用いて、自然・生命現象と数理モデルとつなぐことができないだろうか。地球上で最も人為的な活動の影響が少なく、捕食者による生物攪乱のない南極湖沼生態系は、自然環境下で起きている生命現象・生態学的現象に対して、数理モデルによってより深い理解を得られ、本質に迫れる理想的なフィールドである。フィールドで生じている現象と数理モデルの間にはいつも大きな溝があった。この現状を打破することを目標として本研究の着想に至った。本研究では、フィールドで生じている光環境と生物の応答現象に対して、群集構造や生産性の変化から、A) 群集の進化的応答、B) 群集の鉛直構造の決定要因、C) 空間パターン形成のメカニズムについて数理モデルを構築する。また、湖底光合成生物を培養し、D) 光に対する進化的応答実験を行う。これにより、数理モデルによって得られた仮説の実証、および、モデル化に必要なパラメータを得る。これらの結果から、フィールドで捉えた現象に対する論理的解明と現象の一般化を試みる。

### 3. 研究の方法

以下のアプローチで研究を進める。

生物の光生理学的知見を踏まえた光化学系応答モデルを構築し、生物生産およ

びそれに伴う群集動態をモデル化することで、群集の鉛直構造構築プロセスを明らかにする。

南極湖底に到達する光スペクトルと光合成生物群集マットの光合成データ、光捕集・防御機能を持つ色素(カロテノイド類)の吸光スペクトルデータを用いて、実際の湖の色素の鉛直パターン形成メカニズムを明らかにする。

光資源獲得競争によって光合成生物群集マットが形成されるプロセスを、境界面のダイナミクスを取り入れてモデル化することで、南極湖底生物群集の累積的な構築メカニズムを解明する。これによって群集マット表面形状のバリエーションを説明する。

パターン形成モデルから、円錐型を持つ光合成生物群集の水平方向分布のパターンを明らかにする。

群集内で優占する光合成生物を特定の光波長下で一種もしくは多種共存下で培養し、光スペクトルに対する進化的応答実験を行う。これにより、群集の鉛直構造が短期的応答によるものなのか、適応・進化によるものなのかを明らかにする。

#### 4. 研究成果

南極湖沼環境データと湖底生物群集試料から、水中の光スペクトル特性、および、湖底生物群集中に含まれる光捕集・防御機能を持つ色素類(カロテノイド類、クロロフィル類)と紫外線防御物質(シトネミン、マイコスポリン様アミノ酸)、現場での光合成パターンについて解析を行った。これらのデータに基づき、以下～の数理モデル化を進めた。

「光化学系応答のモデル化」光合成生物の光合成反応中心である光化学系を3状態モデル(アクティブ、非アクティブ、ダメージ)で記述した。光エネルギーの波長区分に応じた光捕集・光防御の最適戦略を求めることで、ある光スペクトルに対する光合成生物の応答メカニズムを理論的に説明した。この成果は学術論文として国際誌に投稿した。

「群集の鉛直構造構築プロセスのモデル化」鉛直的な空間構造の下で光合成生物の生産性を求め、群集の鉛直構造が形成されるプロセスをモデル化した。

「色素の鉛直パターン形成のモデル化」光化学系応答のモデルに鉛直的な空間構造、および、群集動態を導入し、実際の湖底に入射する光スペクトルに対して実際の光合成生物が持つ色素の鉛直構造が形成されるプロセスをモデル化した。この成果は学術論文として国際誌に投稿した。

また、以上の数理モデルと現場データを統合することにより、光スペクトルという環境要因から、湖底に光合成生物集合体が形成されるプロセスを多角的に解析した。これにより、色素の鉛直パターン形成の論理的メカニズムを明らかにした。さらに、無生物環境への生物の侵入と定着プロセスについて、必須となる主要な生元素である窒素源の取り込みと蓄積という観点から、生態系発達の初期段階としてのバクテリア-シアノバクテリア-藻類の競争・共存モデルの構築に取り組んだ。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Sasaki A & Mizuno NA. Partitioning light spectrum: adaptive stratification of phytobenthic community in Antarctic lakes. *Journal Theoretical Biology*, in press

Tanabe Y, Yasui S, Osono T, Uchida M, Kudoh S, Yamamuro M. Abundant deposits of nutrients inside lakebeds of Antarctic oligotrophic lakes. *Polar Biology* 40(3):603-613, 2017年

Kudoh S, Tanabe Y, Uchida M, Osono T, Imura S. Meteorological features observed in Yukidori Zawa, Langhovde and Kizahashi Hama, Skarvsnes on the Sôya Coast, East Antarctica, with comparison of those observed at Syowa Station. *Antarctic Record* 59(2):163-178, 2015年

Kudoh S & Tanabe Y. Report on field research of the Spanish Antarctic Campaign 2014/15: a cooperative international research project with the 56th Japanese Antarctic Research Expedition. *Antarctic Record* 59(2):240-261, 2015年

Kudoh S & Tanabe Y. Limnology and ecology of lakes along the Sôya Coast, East Antarctica. *Advances in Polar Science*

25:75-91, 2014 年

〔学会発表〕(計 15 件)

Yukiko Tanabe, Akiko Mizuno, Akira Sasaki, Sakae Kudoh. Mechanisms of nutrients enclosure inside benthic microbial mats in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of observation data and theoretical study. The 7th Symposium on Polar Science, 2016 年 11 月 29 日, 国立極地研究所 (東京)

Akiko Mizuno & Yukiko Tanabe. Development an analytical method of RGB data for vegetation survey of terrestrial ecosystem on Antarctica. The 7th Symposium on Polar Science, 2016 年 11 月 29 日, 国立極地研究所 (東京)

田邊優貴子, 水野晃子, 佐々木 颯. 南極の貧栄養湖沼の湖底マット内への栄養塩囲い込みメカニズム. 第 81 回日本陸水学会大会, 2016 年 11 月 6 日, 琉球大学 (沖縄)

Akiko Mizuno & Yukiko Tanabe. Development an analytical method of RGB data for vegetation survey of terrestrial ecosystem on Antarctica. SCAR 2016 Open Science Conference, 2016 年 8 月 23 日, クアラルンプール (マレーシア)

Yukiko Tanabe, Akiko Mizuno, Akira Sasaki. Mechanisms of nutrients enclosure inside benthic microbial mats in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of observation data and theoretical study. XXXIII Congress of SIL (International Society of Limnology), 2016 年 8 月 2 日, トリノ (イタリア)

田邊優貴子, 水野晃子. 南極の貧栄養湖沼の湖底マット内への栄養塩囲い込みメカニズム. 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 24 日, 仙台国際会議場 (宮城)

水野晃子, 田邊優貴子. 植生の長期モニタリングに向けた RGB データ解析方法の開発. 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 22 日, 仙台国際会議場 (宮城)

Sakae Kudoh, Yukiko Tanabe. Limnology and ecology of lakes along the Soya Coast, East Antarctica. The 6th Symposium on Polar Science, 2015 年 11 月 17 日, 国立極地研究所 (東京)

Yukiko Tanabe. Limnological and ecological study of Antarctic lakes around Syowa Station. Ecological Seminar for Limnology of Innsbruck University, 2015

年 4 月 20 日, インスブルック (オーストリア)

Tanabe Y, Makoto H, Yamamuro M, Kudoh S. Light quality mediated by terrestrial material cycling changes primary production in Antarctic oligotrophic lakes. 5th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology, 2015 年 4 月 14 日, ウィーン (オーストリア)

Mizuno A & Tanabe Y. Mechanisms of nutrients enclosure inside benthic microbial mats in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of observation data and theoretical study. 5th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology, 2015 年 4 月 13 日, ウィーン (オーストリア)

Tanabe Y & Mizuno A. Mechanisms of nutrients enclosure inside benthic microbial mats in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of observation data and theoretical study. The 5th Symposium on Polar Science, 2014 年 12 月 3 日, 国立極地研究所 (東京)

Tanabe Y, Mizuno A, Uchida M, Yamamuro M, Kudoh S. Mechanisms of nutrients enclosure inside benthic microbial mats in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of observation data and theoretical study. Polar Ecology Conference 2014, 2014 年 9 月 24 日, チェスケーブジヨビジェ (チェコ)

Tanabe Y, Hori M, Uchida M, Osono T, Kudoh S, Yamamuro M. Light quality mediated by terrestrial material cycling changes primary production in Antarctic oligotrophic lakes. SCAR (Science Committee on Antarctic Research) Open Science Conference 2014, 2014 年 8 月 26 日, オークランド (ニュージーランド)

Mizuno A & Tanabe Y. Mechanisms of nutrients enclosure inside microbial mat in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of observation data and theoretical study. SCAR (Science Committee on Antarctic Research) Open Science Conference 2014, 2014 年 8 月 26 日, オークランド (ニュージーランド)

Tanabe Y, Mizuno A. Mechanisms of nutrients enclosure inside benthic microbial mats in Antarctic oligotrophic lakes by combination approach of

observation data and theoretical study.  
99th ESA (Ecological Society of America)  
Annual Meeting, 2014年8月12日, サクラ  
メント(アメリカ)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田邊優貴子(Yukiko Tanabe)  
国立極地研究所・研究教育系・助教  
研究者番号：40550752

### (2) 研究分担者

水野晃子(Akiko Mizuno)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・研究機  
関研究員  
研究者番号：60551497

佐々木 顕(Akira Sasaki)  
総合研究大学院大学・先導科学研究所・教  
授  
研究者番号：90211937

吉山浩平(Kohei Yoshiyama)  
滋賀県立大学・環境科学部・准教授  
研究者番号：90402750

池田幸太(Kota Ikeda)  
明治大学・総合数理学部・専任講師  
研究者番号：50553369

工藤 栄(Sakae Kudoh)  
国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号：40221931

(3) 連携研究者  
なし( )

研究者番号：

(4) 研究協力者  
なし( )