

南極大陸宗谷海岸の親子池湖底堆積物コアによる完新世における 古環境学的研究

Holocene paleoenvironmental studies in the Soya Kaigan of Antarctica
viewed from Lake Oyako-ike sediment core

井上 源喜¹, 本多 英介¹, 谷 幸則², 瀬戸 浩二³, 渡邊 隆広⁴, 大谷 修司⁵,
中村 俊夫⁶, 伊村 智⁷

¹大妻女子大学社会情報学部, ²静岡県立大学環境科学研究所, ³島根大学汽水域研究センター,
⁴東北大学大学院環境科学研究所, ⁵島根大学教育学部, ⁶名古屋大学年代測定総合研究センター,
⁷国立極地研究所

Genki I. Matsumoto¹, Eisuke Honda¹, Yukinori Tani², Koji Seto³, Takahiro Watanabe⁴, Shuji Ohtani⁵,
Toshio Nakamura⁶ and Satoshi Imura⁷

¹School of Social Information Studies, Otsuma Women's University
Karakida 2-7-1, Tama, Tokyo 206-8540, Japan.

²Institute for Environmental Sciences, University of Shizuoka, Yada 52-1, Suruga-ku, Shizuoka 422-8526, Japan.

³Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Nishikawatsucho 1060, Matsue,
Shimane 690-8504, Japan.

⁴Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Aoba 6-6-20, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan.

⁵Faculty of Education, Shimane University, Nishikawatsucho 1060, Matsue, Shimane 690-8504, Japan.

⁶Center for Chronological Research, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan.

⁷National Institute of Polar Research, Midoricho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518, Japan.

キーワード：南極親子池，堆積物コア，バイオマーカー，藻類・シアノバクテリア，AMS ¹⁴C年代測定

Key words : Lake Oyako-ike of Antarctica, Sediment core, Biomarker, Microalgae and cyanobacteria,
AMS ¹⁴C dating

抄録

本研究では南極宗谷海岸の親子池の湖底堆積物コア（Ok4C-1，長さ135 cm）の地質学的解析，加速器による¹⁴C年代測定，クロロフィル化合物・カロチノイド分析ならびに藻類等の顕微鏡観察により，完新世における宗谷海岸地域の環境変動と親子池の古陸水学的変遷を解明した。親子池の湖底堆積物コアの堆積年代，平均堆積速度および平均隆起速度は，それぞれca.220～2,170 cal BP，0.69 mm/yおよび2.2 mm/yであった。TOC濃度は深さ135～63.25 cmでは低かったが，60.95～0 cmでは大きく増加した。クロロフィル化合物およびカロチノイド測定の結果，淡水に生息する緑藻に由来する色素は浅い層（60.95～0 cm）で検出され，海水に生息する珪藻に由来する色素は深い層（135～74.75 cm）で検出された。また，緑色硫黄バクテリアに由来するchlorobacteneは深さ74.75～60.95 cmで検出され，氷河の後退に伴う隆起により沿岸海から成層した塩湖が発達したと考えられる。深さ1.15 cm，28.75 cmおよび56.35 cmでは淡水種の*Leptolyngbya* spp.や*Cosmarium* spp.が優占種であった。また，深度56.35 cmでもこれらの形態が保存されていたのは極めて珍しい。親子池の湖底堆積物は135～74.75 cm (ca.2,190～1,300 cal BP) では海水環境で堆積し，深度74.75～60.95 cm (ca.1,300～1,100 cal BP) は成層した塩湖，深度60.95～0 cm (ca.1,100～220 cal BP) では淡水環境で堆積したと考えられる。

1. はじめに

古環境の変動を研究することは、人間活動に由来する地球温暖化などの今後の環境への影響を見積もるために重要である。海底堆積物、湖底堆積物および氷床コアを用いた地球上の古環境変動に関する研究はこれまでに数多く行われてきた。最終氷期最大期 (LGM 2.0~1.8 万年前) 以来、南極には 2 度の温暖期があり、1 度目は完新世初期の 11,000~9,500 年前、2 度目は完新世中期の 4,500~2,800 年前である^[1]。東南極の宗谷海岸地域を含む南極露岩地域には淡水から海水の数倍の塩分を含む多数の湖沼が分布する^[2]。

宗谷海岸の最終氷期以降の古環境変動は日本南極地域観測隊員らによって研究されている^[3-7]。南極昭和基地地域の露岩地帯には、南極氷河の変遷、特に氷河の後退による隆起に伴う沿岸海の陸地化などの大きな環境変化が認められる。Matsumoto et al.^[6]は、宗谷海岸南部の海拔高度 10 m に位置するスカーレン大池の湖底堆積物コアを用い、中期完新世における氷河の後退に伴う宗谷海岸のアイススタシーによる隆起により、沿岸海から成層した塩湖を経て淡水湖になったことを解明している。また、生物相は海洋環境の珪藻植生から、塩湖の嫌気性環境の緑色硫黄細菌、淡水環境の緑藻類・シアノ細菌に変遷したことが明らかにしている。

本研究では親子池の湖底堆積物コアを用い、全炭素 (TC)、全有機炭素 (TOC)、全窒素 (TN)、全無機炭素 (TIC)、全硫黄 (TS) 濃度の測定、クロロフィル化合物、カロチノイドなどのバイオマーカーの分析、放射性炭素 (^{14}C) を用いた加速器年代測定、顕微鏡による藻類および珪藻の観察を行うことにより、完新世における宗谷海岸の環境変動と親子池の古陸水学的変遷を報告する。

2. 材料

2.1. 親子池の地形学的特徴および堆積物コア

親子池 ($69^{\circ} 28.529\text{N}$, $39^{\circ} 36.169\text{E}$) は宗谷海岸のスカルプスネスに位置する淡水湖で、海拔高度、長径、短径、表面積、最大水深、海岸からの距離および海拔高度は、それぞれ 5 m, 430 m, 150 m, $54,000 \text{ m}^2$, 8.0 m, $165 \text{ m}^{[8]}$ および $2.37 \text{ m}^{[7]}$ である (Fig.1)。宗谷海岸の親子池の湖底堆積物コア (Ok4C-1, 長さ 135 cm) は、瀬戸らにより 2005 年 1 月 14 日に採取され、 -30°C で国立極地研究所

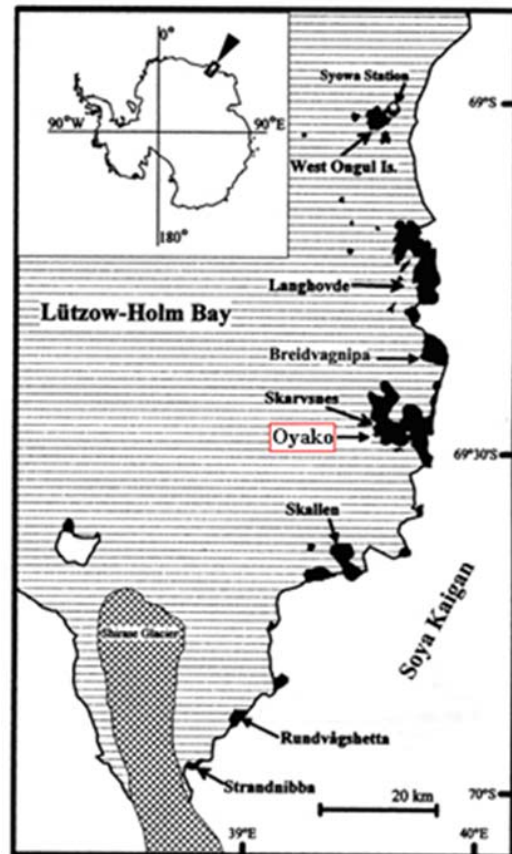


Fig.1 Locality of Lake Oyako-ike in the Soya Kaigan of East Antarctica (revised from Imura et al.^[8]).

に冷凍保存されていた試料である。この池の堆積物試料のコア下部には海成堆積物が見られ、海水から淡水への変化が観察されている。

2.2. 試薬

放射性炭素 (^{14}C) 法による年代測定用の塩酸は和光純薬製のものをそのまま使用した。試料の冷却には液体窒素を用い、エタノールおよび *n*-ペンタンは和光純薬製試薬特級を用いた。

元素分析の標準物質は、Fisons 社のスルファニルアミドをそのまま使用した。助燃材の五酸化バナジウムは和光純薬製の試薬特級を使用した。燃焼管に用いた還元銅、酸化銅、酸化銀、酸化銀コバルトおよび酸化クロムは Thermo Electron Corporation 社のものを用いた。水分吸収用の過塩素酸マグネシウムは Thermo Quest Italia S.p.A.社のものを使用した。

クロロフィル化合物およびカロチノイド抽出の溶媒としては、和光純薬製の高速液体クロマトグ

ラフ用アセトンおよび特級ジエチルエーテル、ヘプタンをそのまま使用した。塩化ナトリウムは市販の食品用の食塩を 500 °C で 2 時間加熱処理し、汚染有機物を除去したのものを使用した。純水は和光純薬製蒸留水をヘキサソールと振り混ぜ、フタル酸などの汚染物質を除いて用いた。

3. 方法

3.1. 放射性炭素 (^{14}C) 法による年代測定

放射性炭素 (^{14}C) 法による年代測定は、Watanabe et al.^[9] の方法に準じて行った。まず 50 mL 遠心沈殿管に試料約 2 g を分取し、2M 塩酸を加え、70~80°C で 3 時間加熱し無機炭酸塩を除去後、純粋 40 mL で洗浄と遠心分離を繰り返し塩酸の除去を行い中性付近にした。試料は乾燥器中 110°C で 12 時間乾燥した。乾固した試料は燃焼によりガス化し液体窒素で捕集し、トラップされないガスを排気した。-100~-90°C のエタノールを用いて水蒸気を凝固させ、凝固されないガスを次のトラップへ移動させた。液体窒素温度の *n*-ペンタンを用いて二酸化炭素と二酸化硫黄を捕集した。*n*-ペンタンから液体窒素を外し、昇華した二酸化炭素を捕集した。二酸化炭素を水素ガスで還元してグラファイトにし、年代測定用試料とした。放射性炭素 (^{14}C) 法による年代測定は、名古屋大学タンデロン加速器質量分析計 (Model-4130 AMS, HVEE) を用いて行った。

3.2. 元素分析

元素分析は Matsumoto et al.^[6] の方法に準じて行った。堆積物試料約 0.5 g をガラス製の 3.5 mL スクリュー管に分取し、約 110 °C で乾固し TC および TS 測定用試料とした。TC および TS 濃度測定は NCS 自動元素分析計 (Fisons NA 2500 Automatic Elemental Analyzer) を用いて行った。試料数 mg をスズ製コンテナに入れて精秤し、これに触媒として五酸化バナジウムを数 mg 加えた。1,800°C で燃焼後、ガスクロマトグラフィー (ポラバック Q, 3.0 m×3 mm i.d., 70°C) で分離し、熱伝導度検出器で検出後、コンピュータプログラムにより定量した。スルファニルアミドを標準物質として検量線法により、TC および TS 濃度の濃度を求めた。これらの測定後、このスクリュー管瓶に 6 M 塩酸を加えて無機炭酸塩を除去後、ホットプレートを用いて約 110°C で乾固した。放冷後直ちにスクリューキャップをしてデシケーター内に保存し、

TOC および TN 濃度測定用試料とした。TOC および TN 濃度測定は、同じ NCS 自動元素分析計で行った。TIC の濃度は TC 濃度から TOC 濃度を引き算することによって求めた。

3.3. クロロフィル化合物およびカロチノイド

クロロフィル化合物およびカロチノイドの分析は、Tani et al.^[10] の方法に準じて行った。試料約 1 g を試験管に入れ、アセトン 3 mL を加え 0°C (氷浴) で 15 分間、井内盛栄堂社製の Ultrasonic Cleaner VS-100 を用いて超音波抽出した後、遠心分離機 (1,000 rpm) にかけてアセトン相を他の試験管に移す操作を 3 回繰り返した。TAITEC 社製の Dry Thermo Unit DTU-1B を用いて 35°C で窒素パージを行い、アセトン抽出液を約 0.5 mL に濃縮した。1 M 塩化ナトリウム水溶液 1 mL とジエチルエーテル 3 mL を加え、抽出物をジエチルエーテル層に移し、遠心分離によりジエチルエーテル層と水層を分離し、水層を除去した。窒素パージを 35°C で行い、ジエチルエーテルを除去後、アセトンで再溶解し、内部標準を 100, 200 および 500 μL 添加して均一にした。遠心分離で上澄みと懸濁物を分離し、上澄みをテフロンライナー付バイアル管に入れ、HPLC 測定用試料とした。

クロロフィル化合物、カロチノイドおよびバクテリオクロロフィルの分離には、Navi C30-5 column (4.6 mm i.d. ×250 mm in length, Wako Pure Chemical Industries, Japan) を用い、カラムには 40 分溶媒 A (アセトニトリル 90%:水 10%) と溶媒 B (酢酸エチル) を流し続け、その後 15 分間溶媒 B を流速 1.0 mL/min で流し続けた。光合成色素およびカロチノイドの同定は、吸収スペクトル (300~700 nm) や HPLC のリテンションタイムを標準物質および文献値と比較することによって行った^[10,11]。

4. 結果

4.1. 堆積層および放射性炭素 (^{14}C) 法による年代測定

親子池の湖底堆積物コア (Ok4C-1) の表層~61.5 cm はシアノバクテリア質堆積物、44.2~44.5 cm には粘土層が含まれていた。深度 61.5~65.5 cm はシアノバクテリア質シルト、65.5~83.7 cm はラミナを伴うシルト、83.7~135 cm はシルト質極細粒砂であった。

年代測定結果 (^{14}C 年代, conventional age) は、

湖底堆積物試料については McCormac et al.^[12], 海洋堆積物試料は Reimer et al.^[13]で歴年代に校正した。また, 海洋堆積物の年代は-1,300年差し引いた^[14]。表層(1.15 cm)の堆積年代は 304±19 cal BP, 深度 132.25 cm では 2,187±56 cal BP となった(Table

1)。深度 0 cm における堆積年代は ca.220 cal BP となった。平均堆積速度は 0.69 mm/y と求められた (Table 1)。

Table 1 Conventional and calibrated age of the Ok4C-1 sediment core from Lake Oyako-ike.

Sample	Depth (cm)	$\delta^{13}\text{C}$	yrBP±1 sigma	Data set	cal BP±1 sigma
Ok001	1.15	-16.3±0.3	294±23	SHCal04*	304±19
Ok018	40.25	-18.0±0.2	895±21	SHCal04*	752±18
Ok043	97.75	-15.3±0.3	2899±24	MARINE09 [#]	1558±39
Ok058	132.25	-16.2±0.2	3411±23	MARINE09 [#]	2187±56

*南半球試料の校正データを使用して産出した^[12]。

[#]海洋リザーバー効果を考慮した校正結果^[13]。また, 海洋堆積物はリザーバー効果を考慮し-1,300年とした^[14]。

4.2. 元素分析

親子池の湖底堆積物コアにおける TC, TOC, TN, TIC および TS 濃度範囲は, それぞれ 0.84~18.91%, 0.46~13.54%, 0.07~1.87%, 0.00~12.21% および 0.24~2.71%, TOC/TC, TOC/TN および TOC/TS 重量比範囲は 0.13~0.96, 4.46~9.35 および 0.64~11.83 と大きく変動した (Table 2)。TC, TOC, TN および TIC 濃度はそれぞれ類似した変動を示し, 深さ 60.95 cm を境に深いところでは急激に減少するパターンを示している。TS 濃度はこれらのパターンとは異なり, 深度とともに徐々に減少するパターンとなっている。このことから, 深さ 60.95 cm より上層の堆積物は, 堆積層の記載結果と一致し, シアノバクテリア質堆積物で, 下層の堆積物はラミナを伴うシルトなどから構成されていることと一致する。深さ 20~25 cm 周辺では有機物濃度の一時的な減少が見られた。また, 深さ 111.55~123.05 cm では TIC 濃度がかなり高かった (Table 2)。

4.3. クロロフィル化合物およびカロチノイド

クロロフィル化合物およびカロチノイドの分析結果を見ると, 深さ 0~60 cm では主として chlorophyll *a*, pheophytin *a*, pyropheophytin *a*, zeaxanthin, pyropheophorbide *b*, pheophorbide *b* および lutein が見られ, *cis*-diatoxanthin, *cis*-alloxanthin および chlorobactene が深さ 75 cm 周辺で見られた

(Table 3)。Fucoxanthin および bacteriochlorophyll *d* は検出されなかった。

4.4. 顕微鏡による藻類および珪藻の観察

親子池の湖底堆積物の藻類の顕微鏡観察は, 深さ 1.15 cm, 28.75 cm および 56.35 cm で行った (Table 4)。これらの3層ではシアノバクテリアが *Leptolyngbya* spp., 珪藻が *Amphora* sp., 緑藻類が *Cosmarium clepsydra* が優占種で, いずれも淡水種であった。これらの湖底堆積物には粘質コロニーが多く見られた。コロニーには 1 μm の幅の糸状体があり, これらは *Leptolyngbya* の藻被と考えられる。興味深いことに *Cosmarium subcrenatum* が 56.35 cm に顕著に検出されている。また, 深さ 1.15 cm には緑藻 *Oedogonium* sp. がみられた。

5. 考察

5.1. 宗谷海岸地域の環境変動

完新世中期の 4,000 ~2,500 BP のグローバルな海面上昇は, 0.7±0.1 m とごくわずかである^[20]。このことから, 東南極の宗谷海岸の海退は, この地域の氷河の後退に伴うアイソスタシーによる隆起と判断される。親子池が沿岸海から独立した塩湖となった年代から平均隆起速度を求めると 2.2 mm/y となる。宗谷海岸のスカーレン大池の平均隆起速度は 2.8 mm/y^[6]なのでこれよりは少し小さいことが判明した。

Table 2 Total carbon (TC), total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total inorganic carbon (TIC), total sulfur (TS), TOC/TC, TOC/TN, TOC/TS weight ratios in the Ok4C-1 sediment core from Lake Oyako-ike (ND : No Data).

Sample	Depth (cm)	TC	TOC	TN	TIC	TS	TOC/TC	TOC/TN	TOC/TS
Ok001	1.15	15.62	13.54	1.87	2.08	1.78	0.87	7.24	7.60
Ok002	3.45	12.60	8.91	1.29	3.69	1.88	0.71	6.91	4.75
Ok003	5.75	9.53	7.04	0.99	2.49	2.03	0.74	7.11	3.47
Ok004	8.05	9.75	6.78	1.03	2.97	1.96	0.70	6.59	3.46
Ok005	10.35	9.38	12.89	1.84	0.00	1.09	-	7.00	11.83
Ok006	12.65	11.46	9.92	1.27	1.53	2.18	0.87	7.81	4.56
Ok007	14.95	9.61	ND	ND	ND	2.20	ND	ND	ND
Ok008	17.25	4.99	ND	ND	ND	2.71	ND	ND	ND
Ok009	19.55	3.67	2.37	0.45	1.30	1.51	0.65	5.26	1.57
Ok010	21.85	1.73	1.36	0.28	0.37	1.37	0.78	4.85	0.99
Ok011	24.15	2.64	1.90	0.40	0.74	1.79	0.72	4.74	1.06
Ok012	26.45	14.57	11.43	1.54	3.13	2.54	0.78	7.43	4.50
Ok013	28.75	14.20	10.09	1.38	4.11	2.25	0.71	7.31	4.48
Ok014	31.05	10.55	7.80	1.15	2.75	1.77	0.74	6.78	4.41
Ok015	33.35	18.91	6.70	0.97	12.21	2.25	0.35	6.91	2.98
Ok016	35.65	8.47	8.08	1.07	0.39	1.85	0.95	7.55	4.36
Ok017	37.95	5.56	4.13	0.62	1.43	1.47	0.74	6.67	2.81
Ok018	40.25	7.29	4.62	0.70	2.67	1.90	0.63	6.60	2.43
Ok019	42.55	10.98	5.20	0.72	5.79	2.37	0.47	7.22	2.19
Ok020	44.85	8.32	9.27	1.29	0.00	2.10	-	7.19	4.43
Ok021	47.15	7.46	6.34	0.83	1.12	1.93	0.85	7.64	3.28
Ok022	49.45	8.70	8.35	1.10	0.35	2.05	0.96	7.59	4.07
Ok023	51.75	11.18	8.77	1.18	2.41	2.04	0.78	7.44	4.30
Ok024	54.05	7.56	6.74	0.93	0.82	1.94	0.89	7.25	3.47
Ok025	56.35	10.18	8.20	1.17	1.97	1.93	0.81	7.01	4.26
Ok026	58.65	7.04	5.49	0.82	1.55	1.68	0.78	6.69	3.27
Ok027	60.95	4.26	3.21	0.45	1.05	1.66	0.75	7.13	1.93
Ok028	63.25	1.80	1.11	0.18	0.70	1.54	0.61	6.14	0.72
Ok029	65.55	2.38	1.70	0.24	0.68	1.64	0.71	7.09	1.04
Ok030	67.85	2.54	1.54	0.19	1.00	1.81	0.60	8.08	0.85
Ok031	70.15	2.36	2.43	0.26	0.00	1.39	-	9.35	1.75
Ok032	72.45	1.43	1.23	0.18	0.20	1.44	0.86	6.83	0.85
Ok033	74.75	1.95	1.40	0.18	0.56	1.41	0.71	7.75	0.99
Ok034	77.05	2.18	1.59	0.20	0.60	1.78	0.73	7.94	0.89
Ok035	79.35	1.86	1.62	0.24	0.24	1.46	0.87	6.73	1.11
Ok036	81.65	2.19	1.05	0.17	1.14	1.27	0.48	6.19	0.83
Ok037	83.95	1.12	1.06	0.17	0.07	0.69	0.94	6.21	1.53
Ok038	86.25	1.68	1.55	0.23	0.13	1.11	0.92	6.73	1.40
Ok039	88.55	1.32	1.08	0.18	0.24	0.91	0.82	5.98	1.18
Ok040	90.85	1.28	0.62	0.11	0.66	0.98	0.48	5.65	0.64
Ok041	93.15	1.43	1.12	0.18	0.31	1.01	0.78	6.21	1.11
Ok042	95.45	1.34	1.24	0.21	0.10	0.98	0.92	5.88	1.26
Ok043	97.75	1.13	0.79	0.15	0.35	0.80	0.70	5.26	0.99
Ok044	100.05	0.90	0.73	0.16	0.17	0.68	0.81	4.58	1.08
Ok045	102.35	0.84	0.69	0.14	0.14	0.63	0.83	4.96	1.11
Ok046	104.65	1.14	0.75	0.13	0.39	0.54	0.66	5.73	1.38
Ok047	106.95	1.86	0.66	0.12	1.19	0.52	0.36	5.52	1.27
Ok048	109.25	1.29	0.36	0.07	0.93	0.40	0.28	5.08	0.90
Ok049	111.55	2.62	0.71	0.16	1.91	0.71	0.27	4.46	1.01
Ok050	113.85	3.36	0.71	0.14	2.65	0.69	0.21	5.04	1.02
Ok051	116.15	2.97	0.65	0.12	2.33	0.55	0.22	5.38	1.18
Ok052	118.45	3.00	0.99	0.18	2.01	0.42	0.33	5.48	2.37
Ok053	120.75	4.67	0.97	0.17	3.70	0.57	0.21	5.69	1.69
Ok054	123.05	4.70	0.59	0.11	4.11	0.41	0.13	5.36	1.45
Ok055	125.35	1.72	0.67	0.11	1.05	0.35	0.39	6.05	1.88
Ok056	127.65	1.08	0.46	0.10	0.63	0.29	0.42	4.56	1.58
Ok057	129.95	1.61	0.71	0.14	0.90	0.24	0.44	5.05	2.92
Ok058	132.25	0.97	0.91	0.16	0.06	0.77	0.94	5.66	1.18

Table 3 Photosynthetic pigments in the Ok4C-1 sediment core from Lake Oyako-ike (pheo-*a*, pheophytin *a*; pyro-*a*, pyropheophorbide *a*; µg/g).

Sample	Depth (cm)	Chlorophyll <i>a</i>	Pheo- <i>a</i>	Pyro- <i>a</i>	Fucoxanthin	cis-Diatoxanthin	Zeaxanthin
Ok001	1.15	16.11	33.31	11.35	0.00	9.66	10.50
Ok003	5.75	23.27	33.90	15.83	0.00	15.93	27.96
Ok007	14.95	9.32	45.61	22.38	0.00	6.43	9.16
Ok010	21.85	3.05	42.26	22.78	0.00	5.83	1.71
Ok013	28.75	35.94	52.56	29.13	0.00	9.72	35.29
Ok016	35.65	154.80	268.90	132.23	0.00	17.34	150.60
Ok018	40.25	2.44	3.48	16.89	0.00	3.85	3.15
Ok020	44.85	60.59	148.03	79.44	0.00	38.87	96.05
Ok022	49.45	30.46	205.01	103.89	0.00	8.87	68.16
Ok025	56.35	22.50	74.57	55.82	0.00	34.26	42.58
Ok027	60.95	4.89	29.13	22.21	0.00	6.85	1.11
Ok030	67.85	19.41	10.42	7.76	0.00	47.00	28.13
Ok033	74.75	12.84	13.46	9.59	0.00	83.43	13.77
Ok036	81.65	0.55	5.14	3.78	0.00	2.36	0.00
Ok039	88.55	0.00	11.78	7.85	0.00	7.80	0.00
Ok042	95.45	0.23	4.72	2.52	0.00	0.61	0.00
Ok045	102.35	0.00	9.93	4.77	0.00	1.23	0.00
Ok047	106.95	0.20	2.93	1.58	0.00	0.73	0.00
Ok050	113.85	0.00	7.10	3.60	0.00	1.05	0.00
Ok053	120.75	0.73	3.74	2.22	0.00	1.61	0.00
Ok055	125.35	0.26	2.75	1.73	0.00	0.60	0.00
Ok058	132.25	0.00	1.49	0.90	0.00	0.53	0.00

Table 3 Photosynthetic pigments in the Ok4C-1 sediment core from Lake Oyako-ike (pheo-*b*, pheophytin *b*; pyro-*b*, pyropheophorbide *b*; continued; µg/g).

Sample	Depth (cm)	Pheo- <i>b</i>	Pyro- <i>b</i>	Lutein	cis-Alloxanthin	Chlorobactene	Bacteriochlorophyll <i>d</i>
Ok001	1.15	10.66	14.93	39.50	1.41	0.00	0.00
Ok003	5.75	11.27	20.12	77.22	13.93	0.00	0.00
Ok007	14.95	12.91	21.17	34.31	6.05	0.00	0.00
Ok010	21.85	4.81	7.97	11.58	2.18	0.00	0.00
Ok013	28.75	5.47	29.69	101.92	17.41	0.00	0.00
Ok016	35.65	90.65	131.67	389.27	9.67	0.00	0.00
Ok018	40.25	5.83	2.39	22.05	2.31	0.00	0.00
Ok020	44.85	31.58	60.93	275.60	41.77	0.00	0.00
Ok022	49.45	59.45	72.85	248.99	4.33	0.00	0.00
Ok025	56.35	24.58	52.75	202.20	25.53	0.00	0.00
Ok027	60.95	6.23	6.70	4.06	4.55	2.89	0.00
Ok030	67.85	9.06	16.30	55.59	0.00	188.98	0.00
Ok033	74.75	19.34	17.01	154.29	54.96	196.35	0.00
Ok036	81.65	0.72	0.60	0.00	2.21	0.00	0.00
Ok039	88.55	3.95	2.88	0.00	4.37	0.69	0.00
Ok042	95.45	0.94	0.66	0.00	0.48	0.00	0.00
Ok045	102.35	0.82	1.27	0.00	1.74	0.00	0.00
Ok047	106.95	0.41	0.29	0.00	0.28	0.00	0.00
Ok050	113.85	1.85	0.82	0.00	0.83	0.00	0.00
Ok053	120.75	0.24	0.26	0.00	0.60	0.00	0.00
Ok055	125.35	0.26	0.20	0.00	0.33	0.00	0.00
Ok058	132.25	0.36	0.18	0.00	1.33	0.00	0.00

Table 4 Relative abundance of algae and cyanobacteria in the Ok4C-1 sediment core from Lake Oyako-ike

Habitat	Species	Depth (cm)		
		1.15 cm	28.75 cm	56.35 cm
	Cyanophyceae			
F	cf. <i>Leptolyngbya</i> spp.	cc	cc	cc
	Bacillariophyceae			
	a centric diatom	-	-	r
	<i>Amphora</i> sp.	c	cc	cc
	<i>Navicula</i> sp.	-	-	r
	<i>Hantzschia</i> sp.	rr	r	r
	Chlorophyceae			
F	<i>Oedogonium</i> sp.	r	-	-
F	<i>Cosmarium clepsydra</i>	c	cc	c
F	<i>Cosmarium subcrenatum</i>	-	+	cc

cc, very abundant; c, abundant; +, common; r, rare; rr, very rare; -, absent.

F: freshwater species.

5.2. 有機成分の起源と生物相

親子池では、完新世中期の氷河の後退および地殻の隆起による海水から淡水への変化が観察されている。これまでに行われたなまず池や大池^[5]およびスカーレン大池^[6]と異なり、堆積物中にはシアノバクテリアの *Leptolyngbya* sp. や緑藻類の *Cosmarium* spp. の形態が保存されていた。

Chlorophyll *a*, pheophytin *a* および pyropheophytin *a* は植物プランクトンに普遍的に検出される色素である^[10,15]。Fucoxanthin および *cis*-diatoxanthin は緑藻類、珪藻およびシアノバクテリアの指標であり、zeaxanthin は緑藻類およびシアノバクテリアの指標となるカロテノイドである^[15,16]。Lutein, pheophorbide *b* および pyropheophorbide *b* は緑藻類、褐藻類や維管束植物の指標である^[10,15,17]。Cis-alloxanthin はクリプト藻に特徴的に含まれるカロテノイドである^[18]。Chlorobactene は、嫌気性光合成バクテリアである緑色硫黄バクテリアの指標である^[19]。ただし、親子池には褐藻類や維管束植物は分布していない。

堆積層の観察、元素分析結果、クロロフィル化合物およびカロチノイドの分析結果、ならびに顕微鏡観察結果から、表層から 60.95 cm は有機物が多く、緑藻類やシアノバクテリアが卓越し、60.95 ~ 74.75 cm では緑色硫黄バクテリアとクリプト藻が多く、74.75 cm より深いところでは珪藻が主体の生物相であったと考えられる。Chlorobactene が深

さ 60.95 ~ 74.75 cm で検出されていることから、緑色硫黄バクテリアが生息しており、堆積環境は硫化水素を含む嫌気性であったと考えられる。

5.3. 堆積環境の変動

堆積年代は ca.220 ~ 2,200 cal BP で、コア表層の年代があまり古くないことから、リザーバー効果は小さいと考えられる。親子池の湖水は雪解け水由来であり、古い炭素を含む氷河融水由来ではないと考えられる。TOC 濃度が深さ 60.95 cm (ca.1,100 cal BP) 付近で大きく変動していることから、この付近で堆積環境の大きな変動、すなわち海水環境から塩湖、淡水環境への変動があったと考えられる。深さ 20 ~ 25 cm では有機物濃度の一時的な減少が見られるが、氷河粘土の流入があったと思われる。深さ 100 ~ 130 cm では TIC 濃度が高く、貝殻や有孔虫化石の寄与によると考えられる。これらの結果より親子池の湖底堆積物は、135 ~ 65.6 cm (2,170 ~ 1,170 cal BP) では沿岸海環境で堆積していたが、氷河の後退に伴うアイソスタシーにより沿岸海が隆起し、深さ 74.75 ~ 60.95 cm (ca.1,300 ~ 1,100 cal BP) では、独立した塩湖となり化学成層し、有光層の下層では嫌気状態となり、緑色硫黄バクテリアの生息を可能にしたと考えられる。深さ 60.95 ~ 0 cm (ca.1,100 ~ 220 cal BP) では淡水環境となり生物生産量が増加し、緑藻類やシアノバクテリアが主要な生物相になったと考えられる。

6. 結論

本研究では親子池の湖底堆積物コアを用い、完新世における宗谷海岸における環境変動と親子池の古陸水学的変遷を解明した。

1) 湖底堆積物コア (Ok4C-1) の表層~61.5 cm はシアノバクテリア質堆積物, 44.2~44.5 cm には粘土層が含まれていた。深度 61.5~65.5 cm はシアノバクテリア質シルト, 65.5~83.7 cm はラミナを伴うシルト, 83.7~135 cm はシルト質極細粒砂であった。

2) 親子池の湖底堆積物コアの堆積年代, 平均堆積速度および平均隆起速度は, それぞれ ca.220~2,180 cal BP, 0.69 mm/y および2.2 mm/y であった。

3) 沿岸海の時期 (135~74.75 cm, ca.2,170~1,300 cal BP) は, TOC 濃度が低く珪藻主体であった。深度 130~100 cm では TIC 濃度が高く貝殻や有孔虫の寄与によると考えられる。

4) 沿岸海から隆起により独立した塩湖の時期 (74.75~60.95 cm, ca.1,300~1,100 cal BP) は, 海水上を淡水が覆うことにより化学成層し, 有光層の嫌気層には緑色硫黄バクテリアおよびクリプト藻が卓越した生物相であった。

5) 淡水湖の時期 (60.95~0 cm, ca.1,100~220 cal BP) は, 生物生産量が大きく, 生物相は緑藻類の *Cosmorium* spp. やシアノバクテリアの *Leptolyngbya* spp. 主体の生物相に変遷した。

6) 興味深いことに深度 56.4 cm (ca.1,040 cal BP) では, 緑藻類やシアノバクテリアの形態が保存されていた。

謝辞

南極では第 45 次および第 46 次日本南極地域観測隊のメンバー, 特に佐藤博士, 上村博士ならびに工藤博士には試料採取ではお世話になり心より感謝する。本研究の一部は, 大妻女子大学人間生活文化研究所「共同研究プロジェクト」(K046)および国立研究所の一般共同研究 No.20-34 の助成を受けたものである。

引用文献

- [1]Bentley, Michael J, Hodgson, Dominic A. Antarctic Ice Sheet and climate history since the last Glacial Maximum. *Pages News*, 2009, 17 (1), 28-29.
[2]Murayama, Haruta. General characteristics of the Antarctic lakes near Syowa Station. *Antarct Rec*, 1977, 58, 43-62 (in Japanese with English abstract).

[3]Yoshida, Yoshio, Moriwaki, Kiichi. Some considerations on elevated coastal features and their dates around Syowa Station, Antarctica. *Mem Natl Inst Polar Res, Spec Issue*, 1979, 13, 220-226.

[4]Miura, Hideki et al. Late Quaternary raised beach deposits and radiocarbon dates of marine fossils around Lützow-Holm Bay: Special map series of National Institute of Polar Research, National Institute Polar Research, 1998, Tokyo, pp1-46.

[5]Matsumoto, Genki I et al. Environmental changes in Syowa Station area of Antarctica during the last 2300 years inferred from organic components in sediments cores. *Polar Biosci*, 2006, 19, 51-62.

[6]Matsumoto, Genki I. et al. Holocene paleolimnological changes in Lake Skallen Oike in the Syowa Station area of Antarctica inferred from organic components in a sediment core (Sk4C-02). *J Paleolimnol*, 2010, 44, 677-693.

[7]Takano, Yoshiki et al. Holocene lake development and glacial-isostatic uplift at Lake Skallen and Lake Oyako, Lützow-Holm Bay, East Antarctica: Based on biogeochemical facies and molecular signatures. *Appl Geochem*, 2012, 27, 2546-2559.

[8]Imura, Satoshi et al. Distribution of aquatic mosses in the Soya Coast region, East Antarctica. *Polar Biosci*, 2003, 16, 1-10.

[9]Watanabe, Takahiro et al. High-time resolution AMS 14C data sets for Lake Baikal and Lake Hovsgol sediment cores: Changes in radiocarbon age and sedimentation rates during the transition from the last glacial to the Holocene. *Quat Internat*, 2009, 205, 12-20.

[10]Tani, Yukinori et al. Photosynthetic pigments in sediment core HDP-04 from Lake Hovsgol, Mongolia, and their implication for changes in algal productivity and lake environment for the last 1 Ma. *Quat Internat*, 2009, 205, 74-83.

[11]Harradine, Paul J. et al. Steryl chlorin esters are formed by zooplankton herbivory. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60, 2265-2270.

[12]McCormac, FG et al. SHCal04 Southern Hemisphere Calibration 0-11.0 cal kyr BP Radiocarbon. 2004, 46, 1087-1092.

[13]Reimer, PJ et al. Intcal09 and marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2009, 51, 1111-1150.

- [14]Berkman, PA et al. Circum-Antarctic coastal environmental shifts during the Lake Quaternary reflected by emerged marine deposits. *Antarct Sci*, 1998, 10, 345-362.
- [15]Verleyen, Elie et al. Coastal oceanographic conditions in the Prydz Bay region (East Antarctica) during the Holocene recorded in an isolation basin. *Holocene*, 2004, 14, 246-257.
- [16]Hodgson, Dominic A et al. Interglacial environments of coastal east Antarctica: comparison of MIS1 (Holocene) and MIS 5e (Last Interglacial) lake-sediment records. *Quat Sci Rev*, 2006, 25,179-197.
- [17]Chihara, Mitsuo (ed). *Biology of Algal Diversity*, Uchida Rokakuho Publishing Co. Ltd., 1997, Tokyo, 386 p. (in Japanese).
- [18]Jeffrey SW et al. (eds). *Phytoplankton pigments in oceanography*, UNESCO Publishing, 1997, Paris, 661 p.
- [19]Spuier, AH et al. Sedimentary pigments as makers for environmental change in an Antarctic lake. *Org Geochem*, 2002, 33, 1655-1665.
- [20] Goodwin, Ian D. Did changes in Antarctic ice volume influence late Holocene sea-level lowering? *Quat Sci Rev*, 1998,17, 319-332.

Abstract

We studied Holocene paleoenvironmental changes in the Soya Kaigan of East Antarctica inferred from the analyses of Lake Oyako-ike sediment core (Ok4C-01, length 135 cm), along with sedimentary facies and AMS ^{14}C dating. The Ok4C-01 core was composed of clayish mud containing laminae between 135-65.5 cm. This was overlain by organic sediments containing algal mats between 65.5-0 cm. The mean sedimentation rate and uplifting rate were estimated to be 0.69 mm/y and 2.2 mm/y, respectively. The low biological production with diatom in coastal marine environments (135-74.75 cm, ca.2,170-1,300 cal BP), changes into green sulfur bacteria in stratified saline lake in 74.75-60.95 cm (ca.1,300-1,100 cal a BP), and then high biological production with cyanobacteria and green algae in lacustrine environments (60.95-0 cm, ca.1,100-220 cal BP). The ongoing retreat of glaciers and ongoing isostatic uplift during the mid-Holocene Hypsithermal (4.5-2.8 cal ka BP) and thereafter are the main reasons for this isolation, whereas eustatic sea level change is believed to have played only a minor role.

(受付日：2013年6月19日，受理日：2013年6月26日)



井上 源喜 (いのうえ げんき) Genki I. Matsumoto
現職：大妻女子大学教授

東京都立大学大学院理学研究科博士後期課程修了。

専門は環境学・地球化学・陸水学・温泉科学。現在は「人間生活文化研究」への投稿論文について、特に「古環境変動」や「極限環境の生物地球化学」などの研究を行っている。

主な著書：地球環境変動の科学（共編，古今書院），宇宙・生命・社会 137億年のサイエンス（開成出版）など