

論文

緑色イオウ細菌が生産する bacteriochlorophyll の側鎖 alcohol の組成変化*

油崎 朋恭**・工藤 卓**・嶋津 佳人**・白木 雄介**・福島 和夫**

(2013年10月30日受付, 2013年12月19日受理)

Abstract

The green sulfur bacteria (GSB) are obligately anaerobic photosynthetic bacteria found in photic zone under euxinic condition with the presence of hydrogen sulfide. Photosynthetic pigments indigenous to GSB are bacteriochlorophylls *c*, *d*, and *e*. The most significant structural difference from chlorophylls *a* and *b* and from bacteriochlorophylls *a* and *b* is the side-chain alcohol other than phytol, primarily composed of farnesol. Hence the detection of farnesol in sediments, for example, implies that the sediments were deposited under the regime of photic zone anoxia.

In the present study, alcohols were analyzed by GC and GC/MS for sediment core samples collected from six meromictic brackish water lakes with the different salinities. A strong positive linear correlation with a regression through the origin was observed among farnesol, and *n*-C_{14:0}, *n*-C_{15:0}, and *n*-C_{16:1} alcohols for individual lake sediments. These results suggest that farnesol and those aliphatic alcohols in the sediments are commonly originated from GSB or their bacteriochlorophylls. Moreover, except for one case, the abundance ratio of farnesol: *n*-C_{16:1} was large (16-17:1) in highly saline but small (8-11:1) in lower saline lake sediments. Hence a tentative hypothesis is proposed that the farnesol/*n*-C_{16:1} ratio may employed as a potential proxy reflecting the salinity of the anoxic bottom water in meromictic brackish water lakes.

1. はじめに

緑色イオウ細菌 (GSB: Green Sulfur Bacteria) は、無酸素かつ光と硫化水素が存在する水塊でのみ生息可能な光合成細菌である。GSB に固有の光合成色素は、bacteriochlorophyll (BChl) *c*, *d*, *e* で、これらは集光機能を果たす chlorosome に含まれる。この chlorosome により、GSB は長波長の光を利用することができ、光量の少ないところでも生息できる。過去の水圏堆積物中に、この GSB 由来の分子化合物 (biomarker) が検出されるならば、堆積物が形成された当時、その場に太陽光の届く水深に無酸素でかつ硫化水素を含む水塊が形成されてい

たことを示す。

先に Caple et al. (1978) は、GSB の BChl *c* の側鎖 alcohol が通常の植物の chlorophyll *a*, *b* や BChl *a*, *b* で見られる phytol だけでなく、farnesol, hexadec-9-enol, geranylgeraniol などを含むことを明らかにした。このため、現生の汽水湖など無酸素層を形成する部分循環湖の堆積物で広く認められる sesquiterpenoid の farnesol は、GSB の生息、すなわち無酸素水塊の存在や出現を示す有力な biomarker のひとつとなっている (福島ほか, 1990; Uemura and Ishiwatari, 1993; 白木ほか, 2003)。

その後 Glaeser et al. (2002) は、環境中から採取し、培養・増殖させた GSB の bacteriochlorophyll

*Variability of side chain alcohols in bacteriochlorophylls produced by Green Sulfur Bacteria

**信州大学理学部物質循環学科 〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1

Yuzaki T., Kudo S., Shimazu Y., Shiraki Y. and Fukushima K.

Shinshu Univ., Dept. Environ. Sci., Fac. Sci.,

Asahi-3-1-1, Matsumoto, Nagano 390-8621, Japan

e の側鎖 alcohol には、上記の C_{16:1} や isoprenoid alcohol だけでなく、C₁₂ から C₁₈ までの直鎖 alcohol も含まれることを報告した。

微生物が作り出す biomarker の場合、わずかな環境条件に応じて卓越種が交代したり、生理特性が変化したりすることで、作り出す分子の微細な変化として現れることは十分考えられる。後者の好例では、alkenone 温度計がある。海洋に生息する単一種の *Emiliania huxleyi* などの円石藻は、周囲の水温に応じて C₃₇ ketone の不飽和度を変え、これが海水温の proxy として広く受け入れられている (Prahl and Wakeham, 1987)。一方前者の例で言えば、主にラン藻が主体とされる温泉藻類で、中鎖長 (C₁₈-C₂₀) の分枝炭化水素が、個々の温泉の多様な物理的・化学的条件に応じて優占種が変わる結果、多様なバリエーションを示す (例えば Shiea et al., 1990; Robinson and Eglinton, 1990)。温泉ほど顕著な環境条件の差異がない淡水湖沼に繁茂するラン藻の *Microcystis* 属では、同一種と見なされるものの中でも、培養株ごとに C₁₈-C₂₀ の異なる組成の分枝炭化水素を生産することが知られている (Fukushima et al., 2006)。したがって BChl の側鎖 alcohol についても、環境条件を反映して生理特性が変化したり、あるいはまた優占種や株構成が変化したりする結果、組成が変動することは十分に予想される。微生物が作り出す biomarker は、より微小な環境条件の差異を反映する可能性がある。

本研究では、Glaser et al. (2002) の指摘に基づき、堆積物中の alcohol 存在比を分析したところ、塩分等の環境条件が異なる汽水湖沼において、BChl の側鎖と見なせる alcohol 組成が変化することを見出した。研究対象とした湖は、久美浜

湾 (京都府)、海鼠池、貝池、歙崎池 (以上鹿児島県)、水月湖、菅湖 (以上福井県) の 6 湖沼で、各湖沼から 26–53 cm の表層堆積物柱状試料を得た。

2. 試料と方法

2.1. 水質調査

本研究で 2009 年以降の調査においては、堆積物採取地点での水温、pH、電気伝導度 (EC)、密度 (σ_t) の深度分布を HORIBA 社製マルチ水質チェッカー U-52 (ケーブル長 30 m) を用いて計測した。それ以前の調査では、酸化還元境界をバンドーン採水器で汲みあげた水中溶存酸素の存否を Winkler 法または硫化水素臭で確認した。U-52 の DO センサーは、時に不調なことがあったが、水温、EC、 σ_t がほぼ一定となる温度層躍以深ではゼロとなると見なせた。2009 年から 2012 年にかけて調査した際に求めた各湖沼の表層水と底層水のごく最近の水質データを Table 1 にまとめた。

2.2. 堆積物試料

本研究で用いた試料は、口径 5 cm の佐竹式採泥器を用いて得た堆積物柱状試料で、それぞれのサンプリング日時、採取地点の水深と堆積物試料長は以下の通りである。福井県若狭町の菅 (すが) 湖: 2009 年 6 月 21 日; 水深 14 m (40 cm), 水月湖: 2011 年 5 月 14 日; 水深 30 m (40 cm), 鹿児島県薩摩川内市の上甕島海鼠池 (なまこいけ): 2002 年 7 月 20 日; 水深 21 m (52 cm), 貝池 (かいいけ): 2002 年 10 月 26 日; 水深 12 m (53 cm), 歙崎池: 2008 年 6 月 3 日; 水深 5 m (39 cm), 京都府京丹後市久美浜湾: 2010 年 11 月 27 日; 水深 20 m

Table 1. Water quality data for the six lakes at ambient sampling dates.

Lakes	Max. Depth (m)	Date	Boundary Depth* (m)	S. Temp ^{&} (°C)	B. Temp ^{&} (°C)	S. EC ^{&} (mS/cm)	B. EC ^{&} (mS/cm)
Kai-ike	12	Aug. 9, 2012	5	31.2	19.9	27.3	42.8
Kumihama-Bay	20	Sep. 27, 2010	5	27.5	15.5	38	40.3
Namako-ike	22	Aug. 1, 2012	12	30.4	13.7	33.3	33.6
Suigetsu-ko	34	Jun. 21, 2009	9	27.6	16.5	8	19.7
Suga-ko	14	Jun. 21, 2009	9	26	16	8.1	18.7
Kazaki-ike	5	Aug. 9, 2012	< 5	29.9	26.1	5.4	17.9

*: Boundary depth means the upper layer where DO disappeared completely.

&: S. Temp., B. Temp., S. EC and B. EC mean temperature and Electric Conductivity of the surface and bottom waters, respectively.

(26 cm)。採取地点は、最深部よりやや東側（流出河川の浦見川より）の水月湖を除き、ほぼ最深部にあたる。柱状堆積物試料は、現地で 1 cm ごとにカットし、ポリエチレン製ビニール袋に入れて研究室へ持ち帰り、分析するまで -20°C で凍結保存した。その後、試料をいったん常温で解凍し、肉厚ガラスビンに移して再び凍結させ、凍結乾燥させた。凍結乾燥後の試料は乳鉢で粉碎し、均一にした。

2.3. 分析方法

alcohol 類の分析には、分析時間の短縮と溶媒の節減を期し、原則として以下の要領で直接ケン化抽出し、溶媒抽出可能な、いわゆる“unbound”態とアルカリ加水分解で遊離する“bound”態を合わせて全量分析する手法を採用した。海鼠池試料のみ有機溶媒 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{methanol}$, 6/4) 抽出物をケン化処理して得た分析結果である。このため海鼠池堆積物の alcohol 定量値は、いわゆる“bound”態を含まないという意味で過小評価されていると考えられる。しかし海鼠池堆積物の 2 試料について 2 つの抽出操作を適用し、alcohol の相対量比を調べたところ、大きな違いはなく、後述するような組成の違いは明らかであった。

凍結乾燥試料 (約 0.3 g) を 10 mL のガラスアンプルに精確に秤りとり、これに 1M の濃度に調整した水酸化カリウム (KOH) の含水 methanol (体積比 5% の蒸留水を methanol に添加) 溶液約 3 mL を加え、溶封して約 100°C に設定した電気炉中で 4 時間加熱してケン化した。

ケン化後、アンプル中の溶液と残さを、少量の methanol と *n*-hexane/diethylether (9/1) を使って、50 mL の遠沈管に移した。遠沈管には、あらかじめ蒸留水 15 mL と *n*-hexane/diethylether (9/1) 15 mL を入れておく。ふたをしてはげしく振とうし、遠心分離器で分離した ($1,500\text{ rpm} \times 5\text{ min}$)。1 回の遠心分離ではエマルジョンが消失しないため、約 0.5 mL の methanol を静かに加え、手で軽く回転させてエマルジョンを消し、再度遠心分離した。その後、パストゥール管で慎重に有機溶媒相 (中性成分) のみを 100 mL 丸底フラスコに移した。この抽出操作は 2 回繰り返す、抽出物は最後にロータリー・エバポレータで乾燥した。

こうして得られた中性成分は、5% の水を添加して活性を下げたシリカゲルカラムクロマトグラフィにより、*n*-hexane/benzene (5/1)、*n*-hexane/diethylether (1/1) を用いて、脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素、alcohol・ステロール画分を溶離した。本研究では、このうち alcohol・ステロール画分のみを分析対象とした。

alcohol・ステロール画分には、内部標準として 100 mg/L の ω -hydroxy-hexadecanoic acid methyl ester のベンゼン溶液を 20 μL 加えた。乾燥後、TMS 化剤 (N,N'-bistrimethyl-trifluoroacetamide : BSTFA : 和光純薬) を 20 μL 加えて封じ、 60°C で 30 分加熱して TMS 化した。

分析には、GC (Shimadzu GC-17A および HP5890-series II)、ならびに GC-MS (HP6890GC-5973MSD) を用いた。分析カラムは、Agilent 社製 DB-5 (0.25 mm i.d. \times 30 m, 膜厚 0.25 μm) および DB-5MS (0.25 mm i.d. \times 30 m, 膜厚 0.25 μm) である。

3. 結果

3.1. 水質

Table 1 の底層水の水温と塩分（ここでは塩分を電気伝導度で表現した。電気伝導度は水温に依存するが、標準的な海水の電気伝導度は約 50 mS/cm である）は、ごく最近の測定結果である。表層水は降雨と河川を通じての陸水の流入状況に依存して変動すると考えられるが、底層水は高潮などの著しいイベントがない限り、ある期間にわたってほぼ定常的であると推定できる。6 湖沼の底層水は、大きく高塩分と低塩分の 2 つに分けられる。高塩分の湖は貝池、久美浜湾、海鼠池で、ほぼ海水の塩分に近く、低塩分の湖は、水月湖、菅湖、鉾崎池の 3 つで、海水の約 1/3 程度の塩分である。

それぞれの湖沼の最大水深は、鉾崎池が 5 m と浅いほかは、貝池・菅湖が 11–14 m、海鼠池・久美浜湾が 20 m ほどで、水月湖が 34 m と最も大きい。

3.2. farnesol と各 alcohol との相関

Figs. 1 と 2 に、例として貝池と水月湖の堆積物から分離された farnesol と *n*-C_{16:1} の濃度プロットを示した。C_{16:1} alcohol-TMS ether (*m/z* 312) は、3 つの異性体からなっていたが、MS から保持時間が

最も短く、量的にもっとも多いピークが *n*-hexadec-9-ene-1-ol であると同定された。本稿では、以下 *n*-hexadec-9-ene-1-ol を *n*-C_{16:1} alcohol と呼ぶ。水月湖の例で示されたように、いずれの湖沼堆積物においても、farnesol と *n*-C_{16:1} alcohol は決定係数 (R²) が 0.9 以上の高い正の相関を示した。また、近似直線はほぼ原点を通った。

Table 2 に farnesol を x 軸に、各 alcohol 濃度を y 軸にプロットしたときの近似直線の傾きと決定係数 R² 値をまとめた。このうち *n*-C_{16:1} alcohol : farnesol 比は、久美浜湾が 1 : 16、貝池が 1 : 17、海鼠池が 1 : 9、： 歙崎池が 1 : 11、水月湖が 1 : 9、菅湖が 1 : 8 であった。高塩分の汽水湖である久美浜湾と貝池は、farnesol が *n*-C_{16:1} alcohol に対して高い存在比を示し、低塩分の汽水湖である歙崎池、水月湖、菅湖では *n*-C_{16:1} alcohol が相対的に多いことが分かる。例外は海鼠池で、貝池・久美浜湾に匹敵するほどの高塩分であるにもかかわらず、1 : 9 と低塩分の湖沼並みの値を示した。

また farnesol は *n*-C_{14:0}、*n*-C_{15:0} alcohol との間にもおおむね高い相関を示し、いずれもほぼ原点を通る直線上にプロットされた。Fig. 3 に水月湖の例をあげて図示した。しかし、*n*-C_{14:0}、*n*-C_{15:0} alcohol の濃度はごく小さく、Table 2 に示されたように、farnesol との相関の回帰直線の傾きはごく狭い範囲にあった。また歙崎池では *n*-C_{14:0}、*n*-C_{15:0} alcohol 濃度のばらつきが大きく、farnesol との間に良好な相関は認められなかった。Table 2 には、farnesol と *n*-C_{16:0} alcohol および phytol との相関の傾きと決定係数 (R²) も記した。一部の湖沼堆積物で farnesol と *n*-C_{16:0} alcohol との間に高い相関がみられるものの、*n*-C_{16:1} alcohol との間で見られたような湖沼間の明瞭な差異は認められなかった。また、phytol と farnesol との間にも正の相関があった。しかし、回帰直線に正の切片が存在することから、phytol が過剰量存在することが分かる。

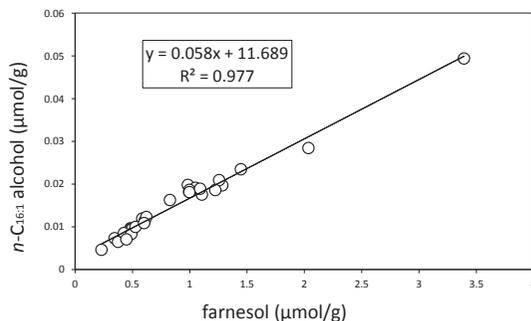


Fig. 1. A linear correlation between farnesol and *n*-C_{16:1} alcohol in highly saline water lake sediment (Kai-ike).

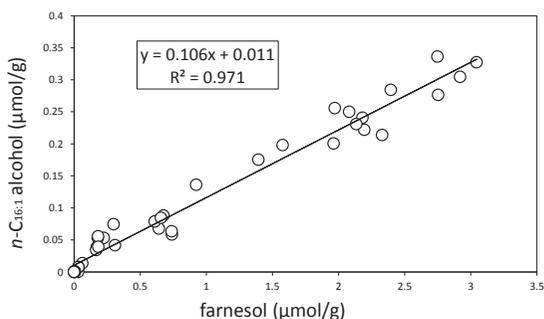


Fig. 2. A linear correlation between farnesol and *n*-C_{16:1} alcohol in lower saline water lake sediment (Suigetsu-ko)

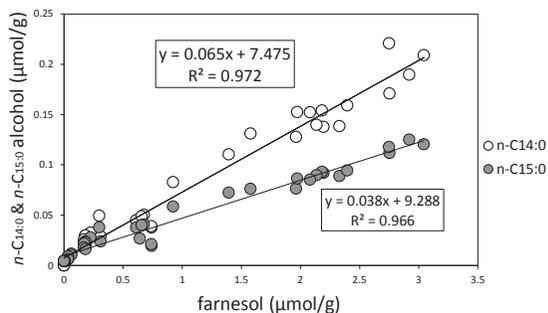


Fig. 3. Correlations of *n*-C_{14:0} and *n*-C_{15:0} alcohols with farnesol in Suigetsu-ko sediment.

Table 2. Correlation parameters between farnesol and alcohols.

Lakes	n	<i>n</i> -C _{16:1}		<i>n</i> -C _{14:0}		<i>n</i> -C _{15:0}		<i>n</i> -C _{16:0}		phytol	
		slope	R ²	slope	R ²						
Kai-ike	29	0.058	0.977	0.034	0.913	0.007	0.718	0.039	0.954	0.301	0.800
Kumihama Bay	27	0.061	0.935	0.075	0.910	0.053	0.899	0.182	0.658	1.588	0.521
Namako-ike	52	0.105	0.987	0.039	0.903	0.025	0.884	0.019	0.896	0.169	0.784
L Suigetu	40	0.106	0.971	0.065	0.972	0.038	0.966	0.031	0.969	0.328	0.770
L Suga	40	0.120	0.971	0.078	0.975	0.045	0.961	0.036	0.956	0.834	0.904
Kazaki-ike	38	0.089	0.953	0.092	0.640	0.087	0.281	0.230	0.460	0.501	0.587

Glaeser et al. (2002) では、GSB 培養株中に、これらのほか、 $n\text{-C}_{12}$ 、 $n\text{-C}_{15:1}$ alcohol などの alcohol を持つ BChl をも検出した。今回我々が扱った堆積物試料では、これらの alcohol は無視できるほど少なく、相関を検討するにはいたらなかった。

4. 考 察

farnesol の濃度は、貝池・水月湖で最大 0.7–1.0 mg/g 乾燥泥、菅湖・欽崎池で 0.25 mg/g、久美浜湾では 0.02 mg/g と大きな差を示した。海鼠池では、分析法が異なるために定量値を直接比較できないが、溶媒抽出で 0.7 mg/g であり、他の湖沼堆積物と同様にケン化抽出したならば、貝池・水月湖に匹敵するか、それ以上の濃度で存在するものと考えられた。この farnesol 濃度は、湖水中の GSB の生息密度ないしは生息可能な水柱の厚みを示すものであろう。それは躍層以深の水深が大きい貝池、海鼠池、水月湖で著しく高いことから予想された。しかし、farnesol 濃度を制御する因子として GSB の生息環境や堆積物の埋没効率なども無視できない。これについてはさらに議論が必要となる。

各堆積物の柱状試料において、farnesol と $n\text{-C}_{14:0}$ 、 $n\text{-C}_{15:0}$ 、 $n\text{-C}_{16:1}$ alcohol の濃度は、欽崎池の $n\text{-C}_{14:0}$ 、 $n\text{-C}_{15:0}$ alcohol を除き、原点を通る直線上にプロットされた。このことは、これらの比較的自生性の強い汽水湖堆積物で検出された $n\text{-C}_{14:0}$ 、 $n\text{-C}_{15:0}$ ならびに $n\text{-C}_{16:1}$ alcohol は、farnesol とともに GSB 由来、または、BChl の側鎖 alcohol である可能性が高いことを示し、Glaeser et al. (2002) の培養実験での知見を支持する結果となった。ちなみに、phytol と farnesol の間にも正の相関（たとえば水月湖では決定係数 R^2 が 0.77）が見られたが、いずれの湖沼でも回帰直線は原点を通らず、farnesol がゼロとなっても phytol は正の値を持った。phytol は、GSB 以外の光合成生物が持つ chlorophyll の側鎖に由来するものもあることから、この結果は妥当である。 $n\text{-C}_{14:0}$ 、 $n\text{-C}_{15:0}$ alcohol は、こうした部分循環汽水湖以外の堆積物でも広く認められ、GSB 以外の起源生物があることは明らかであるが、この farnesol との相関の高さは、本研究で対象とした汽水湖沼の多くにおいては、GSB 由来の寄与が大きいことを示唆している。

興味深いことは、底層水の塩分が高く、海水の 80% 以上の電気伝導度を示した貝池、久美浜湾では $n\text{-C}_{16:1}$ alcohol の存在比が低く、 $n\text{-C}_{16:1}$ alcohol が 1 に対して farnesol が 16–17 であり、塩分が海水の 30–40% と低い欽崎・水月・菅湖では farnesol の存在割合が低い ($n\text{-C}_{16:1}$ alcohol が 1 に対して farnesol が 8–11) と、大きく 2 つのグループに分かれることであった。

GSB の BChl 側鎖の alcohol 組成は、さまざまな環境要素を反映して、優占種または優占株が交代、あるいは分子組成を調整することで、変動する可能性がある。これまで、いくつかの現場観測や培養実験で、GSB は増殖期・安定期という成長段階、到達光の光強度、媒体の塩分に応じて光合成色素の割合や濃度の変化することが知られている (Vila and Abella, 1994; Borrego and Garcia-Gil, 1995; Glaeser et al., 2002)。また光の波長によって増殖速度が異なり、結果的に種構成、また BChls 組成が変わるという可能性も指摘されている (Massé et al., 2004)。ただし、一定の種あるいは株の GSB が光エネルギーの捕集効率を高めるためなど、光環境に依存して側鎖 alcohol を変化させているのかは疑問がもたれる。確かに BChl の側鎖 alcohol の態様は、chlorosome の集塊構造には影響を与える可能性があるとは指摘されている (Zucpanova et al., 2008)。しかし、実験室内での培養実験で、人為的に加えた alcohol が BChl *c* に取り込まれるという興味深い実験結果が報告されており (Larsen et al., 1995; Steensgaard et al., 1996)、側鎖 alcohol が置き換わっても、BChl の吸収スペクトルにはほとんど変化がないとされている。現時点では、側鎖 alcohol の組成の変化は、環境条件に即した GSB の生理特性の変化というよりは、種あるいは株構成の変化を表すとみるべきであろう。

湖沼間の GSB の種組成を変化させるひとつの要因として、GSB の生息場の光条件、言い換えれば光透過に影響する表層水の藻類等の生息密度や濁度、また GSB が生息しうる酸化還元境界の水深があげられる。GSB は、赤色 (600–700nm)、ないしは青色 (400–500nm) の波長の光のもとでもっともよく成長するという報告がある (Vila and Abella, 1994)。また、これまでの研究では、GSB には、緑色で浮遊性の糸状菌 (BChl *c* と *d* およびカロテノ

イド色素の chlorobactene 等を含む)と、より深部に生息する褐色種 (BChl *e* と isorenieratene 等を含む) があって、褐色種はより弱い光に適應するとされている (Brocks and Pearson, 2005)。

本研究で用いた堆積物を採取した時点での溶存酸素がゼロとなる水深、もしくは硫化水素臭が明瞭となる水深は、海鼠池：16m、貝池：4m、鉾崎池：4m、水月湖：4m、菅湖：9m、久美浜湾：4m ほどであった。しかし、当研究室の複数回の調査結果によると、貝池、鉾崎池ではこの深さがほとんど変化しなかったが、海鼠池では 2010 年 6 月と 2012 年 8 月の調査で、この境界が 10m 付近まで上昇していることがわかった。水月湖・菅湖でも、2012 年 9 月、2013 年 6 月の観測では 4m であったが、2009 年 6 月と 2011 年 5 月の観測では 9m 付近であった。これら限られた観測機会からは、GSB が生息可能な水深の上限は、貝池、鉾崎池、久美浜湾では変化が小さいが、水月湖・菅湖では 4–9m、海鼠池では 10–16m の範囲で変動するものと推定された。本研究の時点では、表層水のクロロフィル濃度や透明度、光量子密度の鉛直分布などは計測しておらず。長期にわたる光条件と躍層 (酸化還元境界) の深度に関する情報は無い。このため、光条件の影響を明快に評価することはできない。

また、酸化還元境界が湖底近くまで低下する可能性がある海鼠池や鉾崎池では底棲種が、境界が浅い貝池や久美浜湾では浮遊種が多いため、という優占種の違いにこの差異の原因を求めるという考え方もありうる。しかし、それでは境界以深に十分な水深をもち、浮遊種が優占すると推定される水月湖や菅湖と、4–5m と最も浅く、酸化還元境界がほとんど水–堆積物界面付近にある鉾崎池とが同程度の比を示すということを説明することは容易でない。このように見て来ると、BChl が各湖沼で、過去数十年から数百年にわたり、ほぼ一定の組成を保ち、かつ湖沼間で明瞭な差を示した第一の理由として、光条件の差異を想定することは難しい。

一方、Imhoff (2001) は、GSB をはじめ、光合成細菌が多様な塩分環境に生息することを、塩分に対して適應した一連の系統からなるためとまとめている。本報告では、BChl の側鎖 alcohol 組成を

変動させる主要な因子として塩分を想定した。すなわち本研究で言えば、塩分の高い久美浜湾・貝池では相対的に *n*-C_{16:1} alcohol が少なく、塩分の低い水月湖・菅湖・鉾崎池では *n*-C_{16:1} alcohol の割合が高い系統が卓越するということである。問題は海鼠池である。礫州 (長目の浜) を通して海水が侵入する海鼠池の底層水の塩分 (電気伝導度) は、貝池や久美浜湾ほどではないが海水の 70% 以上と高いにもかかわらず、farnesol : *n*-C_{16:1} alcohol 比は塩分の低い湖沼と同程度となった。このことは、BChl の alcohol 組成を変化させる因子には、塩分以外の要素があることを示唆し、今後、無酸素層上部の光強度の測定、また GSB の分離・培養を通して実証的に吟味する余地を残している。

なお、鉾崎池の堆積物試料では、*n*-C_{16:1} alcohol 以外は良い相関を示さなかった。Fig. 4 に、鉾崎池堆積物における、farnesol と *n*-C_{16:1}、ならびに *n*-C_{14:0} と *n*-C_{15:0} alcohol の鉛直分布を示した。鉾崎池堆積物では *n*-C_{14:0} と *n*-C_{15:0} alcohol が、10 cm 以深で急減する分布を示したのに対し、farnesol と *n*-C_{16:1} alcohol は、表層と 10 cm 付近でピークを形成し、大きく異なる様相を呈した。このことは、水深の浅い鉾崎池では著しい環境変動があった可能性を示唆し、経時的に植物プランクトンと GSB からの alcohol の寄与率が変動したため、もしくは、環境変動によって堆積環境が大きく変化したためと解釈された。

5. 結論

5.1. BChl の alcohol 組成

我が国の 6 つの汽水湖堆積物中の alcohol 分画を分析した。この結果、farnesol と *n*-C_{14:0}、*n*-C_{15:0}、*n*-C_{16:1} alcohol の間に極めて高い正の相関が認められ、回帰直線はほぼ原点を通過するものとなった。このことは、これら直鎖成分を含む alcohol も GSB 由来、もしくは、BChl の側鎖 alcohol であるという可能性があり、Glaeser et al. (2002) の培養株の分析で得られた観察結果を支持した。

5.2. alcohol 組成の湖沼間での変動

n-C_{16:1} alcohol の farnesol に対する存在比は、高塩分の汽水湖では低く (farnesol : *n*-C_{16:1} alcohol =

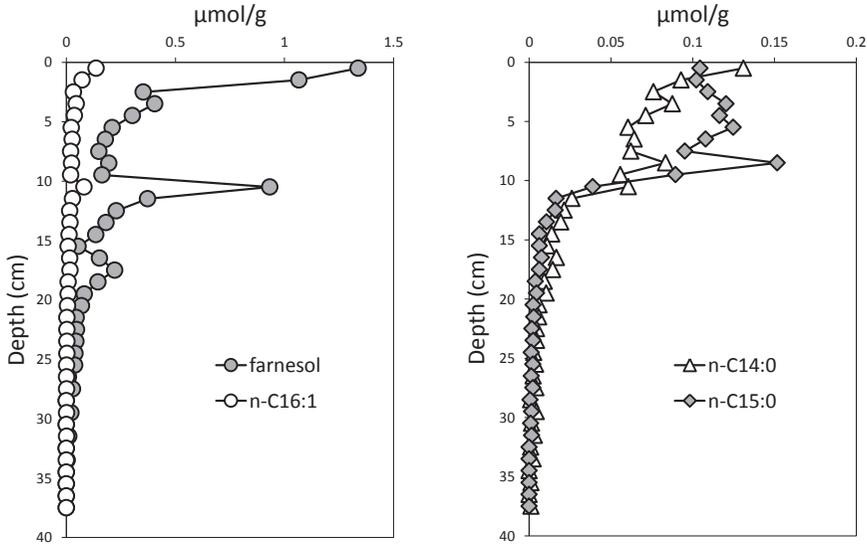


Fig. 4. Vertical variations of alcohols in Kazaki-ike sediment.

16-17:1), 低塩分の汽水湖では高い (同 8-11:1) 結果となった。このことから, farnesol/*n*-C_{16:1} alcohol 比は, 湖の塩分の違いに左右される可能性があり, *n*-C_{16:1} alcohol の相対量は, 堆積時の底層水の塩分を表す指標となる可能性がある。一方で, 海鼠池は底層水が高塩分である汽水湖にも関わらず, farnesol と *n*-C_{16:1} alcohol の存在比が低塩分の汽水湖と似た値を示した。この矛盾は, 引き続き解明されるべき課題として残された。

5.3. farnesol と *n*-C_{14:0} および *n*-C_{15:0} alcohol の相関

farnesol と *n*-C_{14:0}, *n*-C_{15:0} alcohol との相関は, 湖沼間で大きな違いが見られなかった。量的に少ないこれらの alcohol は GSB の生息水塊の環境因子には大きく左右されないものと考えられた。また, 水深の浅い鯉崎池では, GSB の生息範囲が限定され, BChl 以外の寄与が大きいものと推定された。

謝 辞

本研究で扱った堆積物の採取やフィールド調査に際しては, 多くの方に世話になった。また, 拙稿に対し, 査読者の方からは, 有益なコメントをいただいた。この場を借りて感謝申し上げます。

引用文献

Borrego C.M. and Galcia-Gil L.J. (1995) Rearrangement of light-harvesting bacteriochlorophyll homologues as response of green sulfur bacteria to low light intensities. *Photosynth. Res.* **45**, 21-30.

Brocks, J. J. and Pearson, A. (2005) Building the biomarker tree of life. *Rev. Mineralol. Geochem.* **59**, 233-258.

Caple, M. B., Chow, H. and Strouse, C. E. (1978) Photosynthetic Pigments of Green Sulfur Bacteria. *J. Biol. Chem.* **253**, 6730-6737

福島和夫・近藤寛・落合正宏・上村仁・鶴崎実・小椋和子 (1990) 鹿児島県上甕島湖沼群の地球化学的研究 - I. 予報. *陸水学雑誌* **51**, 261-268.

Fukushima K., Sasaki, T. and Park H-D. (2006) Methylalkane composition of cultured strains of Cyanophytae, *Microcystis sp.* *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **29**, 1280-1284.

Glaeser, J., Baneras, L., Rutteres, H. and Overmann, J. (2002) Novel bacteriochlorophyll *e* structure and species-specific variability of pigment composition in green sulfur bacteria. *Arch. Microbiol.* **177**, 475-485.

- Imhoff, (2001) True marine and halophilic anoxygenic phototrophic bacteria. *Arch. Microbiol.* **176**, 243-254.
- Larsen, K.L., Miller M. and Cox R.P. (1995) Incorporation of exogenous long-chain alcohols into bacteriochlorophyll c homolog by *Chloroflexus aurantiacus*. *Arch Microbiol.* **163**, 119-123.
- Messe A., Aris R.L., Keely B.J. and de Wit R. (2004) The impact of different intensities of green light on the bacteriochlorophyll homolog composition of the chlorobiaceae *Posthecochloris aestuarii* and *Chlorobium phaeobacteroides*. *Microbiology* **150**, 2555-2564.
- Prahl, F.G. and Wakeham, S.G. (1987) Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for palaeotemperature assessment, *Nature* **330**, 367-369.
- Robinson, N. and Eglinton, G. (1990) Lipid geochemistry of Icelandic hot spring microbial mats. *Org. Geochem.* **15**, 291-298.
- Shiea, J., Brassell, S.C. and Ward, D. (1990) Mid-chain branched mono- and dimethyl alkanes in hot spring cyanobacterial mats: A direct biogenic source for branched alkanes in ancient sediments? *Org. Geochem.* **15**, 223-231.
- 白木雄介・千吉良晶子・福島和夫 (2003) 部分循環汽水湖－鹿児島県貝池－における懸濁物質と堆積物中のバクテリアバイオマーカー. *Res. Org. Geochem.* **78**, 47-55.
- Steensgaard, D.B., Cox, R.P. and Miller M. (1996) Manipulation of the bacteriochlorophyll c homolog distribution in the green sulfur bacterium *Chlorobium reipidum*. *Photosynth. Res.* **48**, 385-393.
- Uemura, H and Ishiwatari, R. (1993) Sedimentary organic matter as environmental indicators: Lipid compounds in a sediment core of Lake Suigetsu, Japan. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **25**, 841-844.
- Vila X., and Abella C. A. (1994). Effects of light quality on the physiology and the ecology of planktonic green sulfur bacteria in lakes. *Photosynth. Res.* **41**, 53-65.