



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	サンゴ骨格の発光バンドの発光原因と環境指標としての可能性
Author(s)	岨, 康輝; 渡邊, 剛; 島村, 道代
Citation	日本サンゴ礁学会誌, 12(1), 1-15
Issue Date	2010-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56145
Type	journal article
File Information	JCRS_12_1.pdf



サンゴ骨格の発光バンドの発光原因と 環境指標としての可能性

岨 康輝^{1,3,*}・渡邊 剛²・島村道代²・坂本竜彦³・長尾誠也⁴

¹北海道大学大学院理学院自然史科学専攻 〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目

²北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門 〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目

³独立行政法人海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏領域 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

⁴金沢大学環日本海域環境研究センター 〒923-1224 石川県能美市和気町オ24

要旨 熱帯から温帯に生息する造礁性サンゴの骨格は、紫外線を照射するとバンド状に発光する（以後、発光バンドとよぶ）。これまでに、発光原因として、サンゴ骨格を構成する炭酸塩鉱物の微量元素、サンゴ骨格中に含有する有機物（特に腐植物質）、骨格構造に起因する空隙（孔隙）等が挙げられている。その中でも、腐植物質は発光の主要因であるとされ、サンゴ骨格中やその周辺環境に存在する腐植物質が研究されてきた。一方、骨格の低密度部位と発光バンド部位が一致することが報告され、発光バンドの発光強度が骨格構造に依存する可能性が指摘されているものの、特定の発光要因の解明には至っていない。発光バンドは過去の降雨や河川の氾濫（洪水）の高時間分解能の環境記録として利用されてきており、サンゴの発光バンドを信頼性の高い古環境指標として用いるために、厳密な発光メカニズムの解明と環境要因との関連性の検討が望まれる。

キーワード サンゴ骨格、発光バンド、降水、洪水、腐植物質、骨格構造

緒言

熱帯から温帯の浅海に生息する塊状の造礁性サンゴ（以下、特に記述がない場合、塊状のハマサンゴ属をサンゴと略す）は、近過去の環境変動を記録している。サンゴ骨格は主にアラレ石（ CaCO_3 ）よりなり、年に1~2cm程度付加成長しながら年輪を形成する。その結果、大きなサンゴ群体は直径数メートルに達し、200年以上に渡って成長した群体も少なくない。サンゴ骨格は、生育環境の情報（例えば、海水温、塩分、降水量など）を、骨格の伸長量、密度、石灰化量などの骨格成長などの物理情報や、安定同位体比や微量元素量などの骨格の化学情報として記録しているため、それらの情報をサンゴの成長方向に沿って解析することによって、過去の海洋表層環境の変遷を2週間~1年程度の時間分解能で復元することが可能である。

サンゴ骨格は、紫外線領域（波長が約1~400nmの範囲）の光を照射すると年輪に沿ってバンド状もしくはライン状に発光する。それらの発光は、目視により黄白、黄、黄緑、灰白色を呈する部位を発光バンド、青色の部位を呈する非発光バンドとして区別されている（以下、特に記述がない場合、サンゴ骨格の発光バンドを発光バンドと略す）。また、発光は消光するまでの時間によって、蛍光と燐光に区別されるが、これまでの研究では燐光も蛍光として扱われてきた。しかしながら、Wild et al. (2000) は、サンゴ骨格に紫外線を照射したときの発光には、蛍光（発光全体の約90%）と燐光（発光全体の約10%）が共存することを定量的に示した。そのため本論では、先行研究の紹介においては論文で用いられた光の呼称に従い、それ以外はまとめて発光と呼称する。発光バンド分析は、骨格の伸長量や密度の分析の際に用いられる軟X線画像撮影やγ線密度測定（Carricart-Ganivet and Barnes 2007; Chalker and Barnes 1990）と同様に、繰り返し分析が可能な非破壊分析手法により行われる。このような非破壊分析は、試料の破壊を伴う化学分析に比べ、簡便

*連絡著者

E-mail: sowa@mail.sci.hokudai.ac.jp

担当編集者：井龍康文（地質・地理分野）

で迅速な解析手法であり、繰り返し分析が容易であるため、現在ではサンゴ骨格による古環境復元にとって重要な解析手法とされている。

発光バンドの発光強度をサンゴの成長方向に沿って解析することによって、降水量、洪水にともなう河川流量、洪水の頻度の季節～経年変動が復元されてきた（例えば、Isdale 1984; Smith et al. 1989; Scoffin et al. 1989; Lough et al. 2002; Nyberg 2002; Peng et al. 2002; Hendy et al. 2003; Lough 2007）。しかしながら、発光バンドの強度と降水量ならびに河川流量、洪水の発生頻度の関係は、両データの相関で記述された経験則であり、その因果関係は明らかになっていない。

発光バンドの発光要因は、主に有機物（特に陸源の腐植物質や海洋起源の溶存態有機物）に由来する説（例えば、Boto and Isdale 1985; Susic et al. 1991; Matthews et al. 1996）と、骨格構造や骨格を構成する鉱物の性質に由来する説が示唆されてきた（例えば、Barnes and Taylor 2001a, 2001b, 2005）。腐植物質とは、生物の死後、生物体有機物が微生物的・化学的作用を受けて生じた有機物で、「化学構造が特定されない有機物（生体有機物）」の総称であり、黄色～褐色を呈している（石渡 2008）。石渡（2008）によると、土壌や堆積物中の腐植物質は、アルカリ溶液で抽出した後、酸で溶解しない物質は「フミン酸」、酸で溶解する物質は「フルボ酸」と定義される。また、腐植物質は天然水中にも存在しており、これらは「水腐植物質」と称される。腐植物質の分子量は数百～数百万と幅広く、不飽和脂肪族化合物や芳香族化合物などの蛍光物質を含んでおり（長尾 2008）、大陸や海洋に普遍的に存在している（石渡 2008）。また、天然水中の有機物は孔径 0.45 μm を通過する溶存態有機物と通過しない懸濁態有機物に分けられており、目視で確認できる発光バンドの明度、彩度、色の違いは、以上の陸上に起源をもつ腐植物質や海洋の溶存態有機物がサンゴ骨格中に含まれ、その種類や濃度が異なることにより生ずる可能性が指摘されている（例えば、Boto and Isdale 1985; Susic et al. 1991; Matthews et al. 1996; Tudhope et al. 1996）。一方で、サンゴ骨格の孔隙や結晶の物理的特徴・化学的組成がそれらを引き起こす原因であるとも指摘されてきた（Barnes and Taylor 2001a, 2001b, 2005）。例えば、サンゴの発光バンドと孔隙の少ない低密度部位は概ね対応してい

ることが明らかにされてきている（例えば、Isdale 1984; Scoffin et al. 1989; Klein et al., 1990）。しかしながら、その逆の場合も報告されている（例えば、Scoffin et al., 1989）。そのため、未だ、発光要因に関して一致した見解は得られていない。したがって、発光バンドを用いて過去の降水量、河川流量、洪水の頻度など情報を復元する研究の信頼性を向上させるためには、発光バンドの発光要因とメカニズムを解明することが必要である。

本論文では、第2章で発光バンドを用いた古環境復元研究と発光要因に関する研究例を紹介し、第3章ではそれら先行研究例の問題点と今後の課題を指摘し、第4章では発光バンドの古環境指標としての有効性と今後の展望に言及する。

発光バンドに関する研究例

古環境復元への応用

現生サンゴを用いた近過去の古環境復元 発光バンドを用いた古環境復元研究では、目視による発光バンドの明度や、特定の蛍光波長の強度を環境記録と対比し、それらから見出された関係を用いて過去の降水量、洪水の頻度、河川流量の変遷が復元されてきた（表1）。

Isdale (1984) はオーストラリアのグレートバリアリーフ (GBR) にある Pandora Reef からサンゴコア試料を採取し、骨格密度バンドで時間軸を設定した後、1930～1980年までの蛍光バンドの強度を3ヶ月程度の時間分解能で分析した。蛍光バンドの強度は、長波長紫外線を用い、蛍光を光ファイバーを通して分光光度計で計測された。そのように計測された蛍光強度と Pandora Reef に注ぐ Burdekin River の実測流量の間には有意な正の相関関係が見出され、蛍光バンド強度は Burdekin River の流量指標となることが示された（図1）。Isdale and Kotwicki (1987) は、Pandora Reef から採取したサンゴの発光バンドを用いて約100年間（1885～1984年）の Burdekin River の流量を復元した。その結果復元された流量と、実測された降水量、河川流量、Burdekin River の流域に隣接する Eyre Lake への淡水流入量は正の相関関係を示すことより、Burdekin River の流量から Eyre Lake への淡水流入量を復元できる可能性が示された。さらに、Burdekin

表 1 試料状態サンゴ骨格の発光バンドを用いた古環境復元研究と発光要因に関する研究の例。主な試料採取地域、発光バンドと非発光バンドの色、発光バンド画像、前処理方法、分析手法、励起/特徴的な蛍光波長を記載した。記載がないものは、n.d. (no description) で表した。また、LW (long wavelength ultraviolet) は長波長領域 (315–400 nm) の紫外線を示す

Table 1 Analytical methods in previous studies for coral skeletal luminescence. Listed are references, sample locations, statuses, colors of the luminescence, images of the luminescence, pretreatment methods, analytical methods, and excitation/emission wavelength (nm). n.d. and LW indicates non description and long wavelength ultraviolet (315–400 nm), respectively

引用文献	主な試料採取地域	試料状態	発光 (蛍光) / 非発光色バンド色	発光 (蛍光) 画像	前処理方法	分析手法	励起波長 (nm) / 特徴的な蛍光波長 (nm)
古環境復元に関する研究							
Isdale (1984)	GBR, Australia	板状	黄緑 / 青	白黒	n.d.	単波長励起	LW / n.d.
Isdale and Kotwicki (1987)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	LW / n.d.
Scoffin et al. (1989)	Molupore, PNG	板状	白黄	白黒	ブリーチ	単波長励起	LW / n.d.
	Jakarta, Indonesia	板状	/ 暗青灰		ブリーチ		
Smith et al. (1989)	Florida, U.S.A	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	n.d. / 460
Klein et al. (1990)	Sinai, Israel	板状	黄緑 / 青	白黒	n.d.	単波長励起	~ 360 / n.d.
Kotwicki and Isdale (1991)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	LW / n.d.
Neil et al. (1995)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	360 / 460
Tudhope et al. (1996)	Hhofar, Oman	板状	bright / dull	白黒	commercial ブリーチ	単波長励起	360 / n.d.
Isdale et al. (1998)	GBR, Australia	板状	n.d.	白黒	n.d.	単波長励起	360±20 / n.d.
Lough (2002)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	n.d.	目視	n.d.
Nyberg (2002)	Mona, Puerto Rico	板状	bright (黄緑) / dull (青)	n.d.	NaOH, HNO ₃ , H ₂ O ₂	3D-EEM	325 / 480, 390 / 530
Peng et al. (2002)	Logwan, China	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	266 / 350 ~ 500
Hendy et al. (2003)	GBR, Australia	板状	黄・黄緑 / 青・青紫	白黒	n.d.	目視	n.d.
Lough (2007)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	n.d.	目視	n.d.
Nyberg et al. (2007)	Catalina, Dominica Republic	板状	bright (黄緑) / dull (青)	n.d.	NaOH, HNO ₃ , H ₂ O ₂	3D-EEM	390 / 490
Carriacat-Garnier and Barnes (2007)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	NaClO	単波長励起	390 / 490
Jupiter et al. (2008)	GBR, Australia	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	390 / 490
発光要因に関する研究							
Boto and Isdale (1985)	GBR, Australia	板状・溶液	黄緑 / 青	n.d.	n.d.	単波長励起	360 / 480 - 530
Susic et al. (1990)	GBR, Australia	溶液	黄緑 / 青	n.d.	n.d.	単波長励起	340 / n.d.
Fang and Chou (1992)	Non-Wan, Taiwan	溶液	bright / dull	n.d.	Ca(ClO) ₂ ・H ₂ O ₂	単波長励起	350 / n.d.
Milne and Swart (1994)	Southeast Caribbean, Tobago	板状	n.d.	n.d.	n.d.	単波長励起	337 / 460
Matthews et al. (1996)	Puket Thailand	板状・溶液	bright (黄緑) / dull (青)	n.d.	n.d.	3D-EEM	310 / 430, 340 / 450, 390 / 490 280 / 320 - 350
Wild et al. (2000)	Madang, PNG	板状	bright (黄緑) / dull (青)	n.d.	n.d.	3D-EEM	340 / 450, 370 / 470, 390 / 485 420 / 505, 450 / 530
Barnes and Taylor (2001a,b)	Wadi Ayn, Oman	板状・粉末	黄緑 / 青	白黒	塩素系 commercial ブリーチ	単波長励起	390 / n.d.
Barnes et al. (2003)	GBR Australia	板状	黄緑 / 青	n.d.	NaHClO	単波長励起	390 / 490
Barnes and Taylor (2005)	GBR Australia	板状・粉末	黄緑 / 青	n.d.	NaHClO	単波長励起	390 / 490

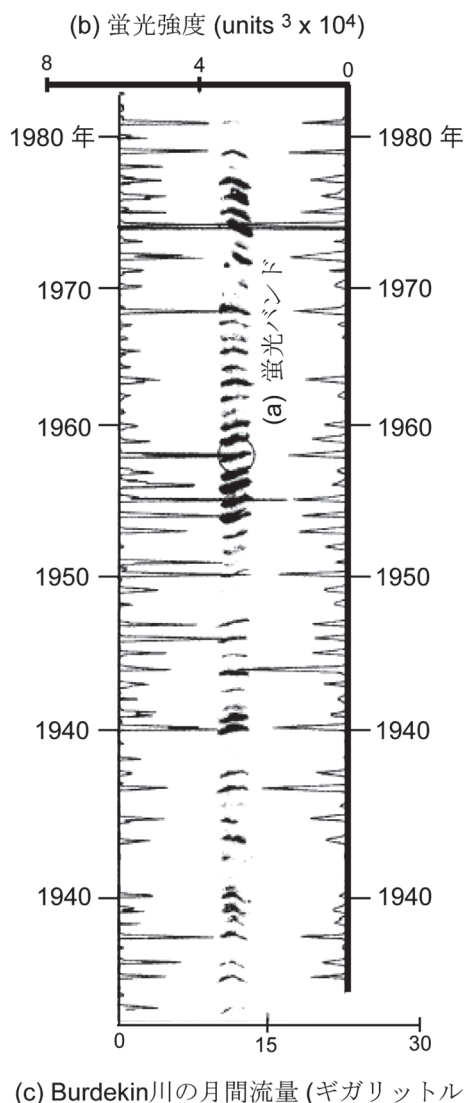


図 1 オーストラリアの Pandora Reef で採取されたサンゴ骨格の蛍光バンド (a), その蛍光強度 (b; 細線), Burdekin River の月間流量 (c; 細線)。Pandora Reef には, Burdekin River が注ぎ込んでおり, そのサンゴ礁環境は河川水の影響を受けている。Isdale (1984) の図を一部改変

Fig. 1 Comparison of (a) coral fluorescent bands collected from Pandora Reef, Australia. (b) Intensity of the bands (bold line) and (c) monthly river flow of Burdekin River (narrow line). Modified from Isdale (1984)

River の流量や Eyre Lake への淡水流入量が南方振動の指標 (Southern Oscillation Index; SOI) と良い相関を示していることが明らかにされた。なお, 彼らの蛍光分析の手法は Isdale (1984) と同様であった。その後, Kotowicki and Isdale (1991) は,

Isdale (1984) と Isdale and Kotwicki (1987) が使用した試料を用い, 約 250 年間 (1735~1980 年) の Eyre Lake の淡水流入量を復元した結果, Eyre Lake の水循環はエル・ニーニョと南方振動 (El Niño/Southern Oscillation; ENSO) が駆動する気候変動の影響を受けることを示した。Neil et al. (1995) は, GBR の Tully River 河口の Rockingham Gulf から 6 本のサンゴコアを採取し, 蛍光バンドの蛍光強度と Tully River の流量を比較した。蛍光バンドの強度は, 3 mm 径の励起波長 360 nm の紫外線を照射し, 蛍光波長 490 nm の蛍光強度を原子吸光分光光度計で測定して求められた。その結果, 蛍光バンド部位の蛍光強度と Tully River の年間合計流量とが高い正の相関関係を示すことが判明した。Isdale et al. (1998) は, GBR の Pandora Reef と Havanah Island からそれぞれ 1 本ずつサンゴコアを採取して蛍光バンドを分析し, 1644~1986 年のうち計 337 年間分について Burdekin River の流量と Queensland の降雨を復元し, 北東オーストラリアの水文環境を議論した。蛍光バンドの強度は, 励起波長 360 ± 20 nm を用いて, 分光光度計により全蛍光波長から見積もられた。その結果, 同地域の陸域環境は, 17 世紀後半~18 世紀中頃と 19 世紀後半に湿潤化し, 18 世紀後半~19 世紀中頃と 20 世紀中頃に乾燥化したと推察された。Hendy et al. (2003) は, GBR の 7 つのサンゴ礁から採取した 8 本のサンゴコア記録を統合し, 1615~1988 年のうち 373 年間の発光バンドの強度変遷を目視で 4 段階 (0=弱い, 1=中程度, 2=強い, 3=非常に強い) に分けて評価した。その結果, 試料の発光バンドの強度変動が Burdekin River の河川流量と Queensland の夏期降水量の代替指標になることが示された。また彼らは, これらの発光バンド強度と Mann et al. (2000) が復元した Niño3 監視区域の海水温の経年変動は年代によって正や負の相関を示すことを見出し, Burdekin River の河川流量と ENSO の関係は一定の関係がなく, 年代によって変化していると結論づけた。Lough (2007) は, GBR に流れ込む Herbert River, Burdekin River, Pioneer River, Fitzroy River の河口域に位置する 15 のサンゴ礁から採取した 25 本のサンゴコアに対して, 目視による 4 段階の発光バンド強度測定 (0=発光バンドがない, 1=弱い, 2=中程度, 3=強い) を行い, 1631~1996 年の GBR への淡水流入量と Queensland の降水量

を推定した。その結果、オーストラリア北東部では20世紀に降水量と河川流量は増加したが、以前より強い乾燥や湿潤状態が生じるようになったことを示した。

Peng et al. (2002) は、中国の海南島南東部からサンゴコアを採取し、その蛍光バンドの蛍光強度と降水量（1953～1998年）および同海域に流入する河川流量（1960～1998年）を比較した。彼らは、励起波長266nmの光を0.15～0.2mm径に絞り、それを入射角45°で照射し、蛍光波長350～500nmを高速オシログラフで測定して、蛍光強度を求めた。その結果、蛍光バンド強度と降水量および河川流量との間には高い正の相関関係が見出された。

サンゴ化石を用いた古環境復元 サンゴの発光バンド分析は、化石試料を用いた古環境分析にも応用されてきた。Klein et al. (1990) は、紅海に面するSinai半島で採取した第四紀中・後期更新世間氷期の化石サンゴと現生サンゴの蛍光バンドを観察し、両者に含まれるフミン酸を高速液体クロマトグラフィー（High Performance Liquid Chromatography; HPLC）で定量した。その結果、化石サンゴのみに蛍光バンド部位が確認され、化石サンゴの非蛍光バンド部位のフミン酸含有量は、GBRで採取された現生サンゴの非蛍光バンド部位の含有量と近似していることが示された。なお、この化石サンゴの鉱物相は、ほとんどがアラレ石であること、骨格中のSr含有量が現生サンゴ骨格の含有量とほぼ等しいことから、続成作用を受けていないと解釈された。さらに、化石サンゴ骨格中のフミン酸含有量が周辺の土壌より高く、またフミン酸含有量がサンゴの成長方向に沿って特定の変化を示さないことから、化石サンゴに含まれるフミン酸は初生的なものであり、当時の降水や洪水を反映しているとみなされた。以上の結果から、彼らは、間氷期のSinai半島の環境は現在よりも湿潤であり、モンスーンの影響を受けていたと推定した。

ハマサンゴ属以外のサンゴの発光バンドを用いた古環境復元 大西洋ではハマサンゴ属以外のサンゴの発光バンドが古環境復元に用いられてきた。Smith et al. (1989) は、アメリカのFlorida湾にあるLignumvitae Keyから北西6kmの場所に生息していた*Solenastrea* 属のサンゴを採取し、その蛍光バン

ドの蛍光強度とサンゴの生息場所に淡水を供給するEverglades湿地帯から淡水流入量の実測値（1940～1985年）を比較し、これを基に実測値のない1881～1939年の淡水流入量を復元した。蛍光強度は、紫外線照射で発生した490nmの蛍光波長が単色光分光器を用いて測定された。その結果、彼らは、排水溝網の建設による水路の変化によってEvergladesに流れ込んでいた淡水流入量が減少したことを定量的に示した。Nyberg (2002) は、カリブ海南東に位置するMona Islandで採取した*Montastrea* 属に属するサンゴの発光バンドの蛍光強度を、サンゴの成長方向に沿って、励起波長、蛍光波長、蛍光強度を測定できる三次元蛍光分光光度法（Three-Dimensional Excitation-Emission-Matrix (3D-EEM) spectroscopy）により分析したところ、励起波長425nm/蛍光波長480nmと励起波長390nm/蛍光波長530nmの蛍光強度の変動が降水量とは正の相関関係にあり、風速とは負の相関関係にあることを示した。すなわち、この海域の降水量と風速とは負の相関を示し、サンゴの発光バンドから過去の降水量と風速を推定できることが示された。ハリケーンの発生海域では、ハリケーンは主に表面海水温とウインドシアの大きさに起因して発生し、その結果として、貿易風の強化及び降水量の低下、湧昇流の強化を引き起こす。そのため、降水量の代替指標であるサンゴの発光バンドと、湧昇強度の代替指標である海洋堆積物中の有孔虫の含有量から貿易風の水平風速変化及びウインドシアが復元できる（Nyberg 2002, Nyberg et al. 2007）。Nyberg et al. (2007) は、それら復元情報を検討し、大規模なハリケーンの発生頻度は1760～1990年にかけて低下し、1995年以降に再び活発になってきていることを示した。

サンゴ生育地点の空間分布と発光バンド強度の関係

Scoffin et al. (1989) は、パプアニューギニア（PNG）とインドネシアで採取したサンゴの蛍光バンドと密度バンドの白黒画像を撮影して、両者を比較検討した。その結果、サンゴの生息地が陸地から離れるほど発光バンドの明度が低くなるものの、蛍光・非蛍光バンド部位の対は明瞭に目視できることが示された。ただし、PNGのサンゴでは蛍光バンドの形成時期と降水の多い時期が一致しているものの、インドネシアのサンゴでは、そのような蛍光は認められ

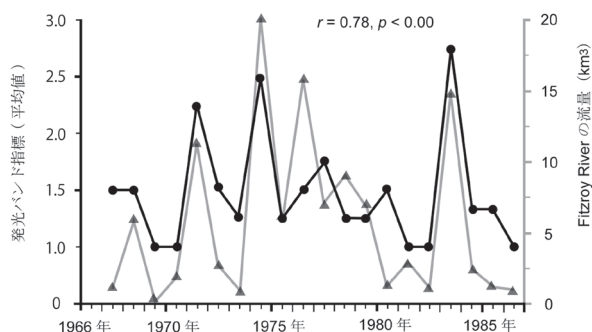


図2 Middle Percy Island で採取されたサンゴの発光バンド指標（黒色）の年平均と、その海域に流れ込む Fitzroy River の各年の9月から10月までの合計流量（灰色）。発光バンド指標は、採取した4群体のサンゴの発光強度を、それぞれ目視により0～3までの4段階に分けて平均化したもの。Lough et al. (2002) の図を一部改変。

Fig. 2 Index of annual coral luminescence collected from Middle Percy Island (black line and circles) and annual (October–September) Fitzroy River flow (gray line and triangles) during 1967–1986 years. The luminescence indices were categorized intensity of visual luminescence as 4 grades from averaged 4 coral colonies. Modified from Lough et al. (2002)

なかった。Lough (2002) は、GBR にある 30 のサンゴ礁から、直径 20～50 cm 程度のサンゴ群体を 232 個採取し、それらの発光バンド強度を目視で 4 段階（0＝発光バンドがない、1＝弱い、2＝中程度、3＝強い）に区分した。その結果、発光バンドの平均的な強度は陸から離れるほど、また水深が深くなるほど低くなることが示された。また、これらのサンゴの発光バンドの強度は、各サンゴ礁近隣の実測河川流量と正の相関関係があり、モデル計算によって得られた各地点の塩分と負の相関の関係にあることから、GBR のサンゴの発光バンドは降水量とそれに伴って変化する河川流量を復元するための有効な代替指標であるとされた（図2）。一方、Carricart-Ganivet et al. (2007) は、GBR の Rib Reef において水深 20 m までの水深域を 5 m 間隔で 4 つの深度帯に区分したうえで、それぞれの深度帯から直径 11～20 cm 程度のサンゴを 6 群体ずつ採取し、それらの骨格の石灰化量、密度、成長量、発光強度を比較した。発光強度には、励起波長に 360 nm の紫外線を用い、490 nm の発光波長を光電子倍增管で測定するという方法が採用された（分析法の詳細は、

Barnes et al. 2003 を参照されたい）。その結果、骨格の石灰化量、密度、成長量や発光強度に有意な深度変化は認められなかった。また Jupiter et al. (2008) は、陸域からサンゴ礁への淡水、堆積物、栄養塩の流入を評価するため、GBR 南部に注ぐ Pioneer River の河口地域から異なる位置にある 3 つの Reef から合計 10 本のサンゴコアを採取し、発光バンド強度と、Ba/Ca 比および $\delta^{15}\text{N}$ を測定した。発光強度の測定には Carricart-Ganivet et al (2007) と同様の方法が用いられた。その結果、発光バンドの相対発光強度の平均値は沿岸から沖へ向けて減少していることが示された（図4）。一方で、淡水流入量の積算値と発光バンドの相対強度の最大値を比較した結果、沖合側の 2 地点では両者は有意な正の相関関係を示すのに対し、沿岸に近接する地点では相関関係が弱かった。

以上のように、発光バンドを用いた古環境復元や発光バンドと海洋環境変動に関する研究は、これまで様々な場所で行われており（図3）、一般に、発光バンドが降水や洪水の代替指標になることが経験的に示されてきた。

発光要因に関する研究例

発光要因～有機物～ サンゴの発光バンドは、上述の腐植物質等の有機物以外に、骨格構造に起因して生じるとする見解がある。ここでは、有機物に発光要因を求めた研究例を紹介した後、骨格構造や鉱物に発光要因を求めた研究例を紹介する。

Boto and Isdale (1985) は、オーストラリアの Pandora Reef で採取したサンゴ骨格中に見られる黄緑色の蛍光バンド部位と青色の非蛍光バンド部位を切り出し、360 nm の励起波長で紫外線を照射し、両バンド部位の蛍光スペクトルを比べたところ、両者の差は蛍光波長 480～530 nm の蛍光スペクトルで最大となった。その後、彼らはサンゴ骨格中に腐植物質が存在していることを示し、黄緑色の蛍光バンド部位にはフルボ酸が多いことを明らかにした。さらに、蛍光バンド部位の形成時期がモンスーン時の降雨および洪水時期と一致することを根拠に、蛍光バンド部位中のフルボ酸が陸源物質由来であることを初めて推定した。

Susic and Boto (1989) は、HPLC によるフミン酸の定量分析法を開発した。その後、Susic et al. (1991) は、その手法を利用して、オーストラリア

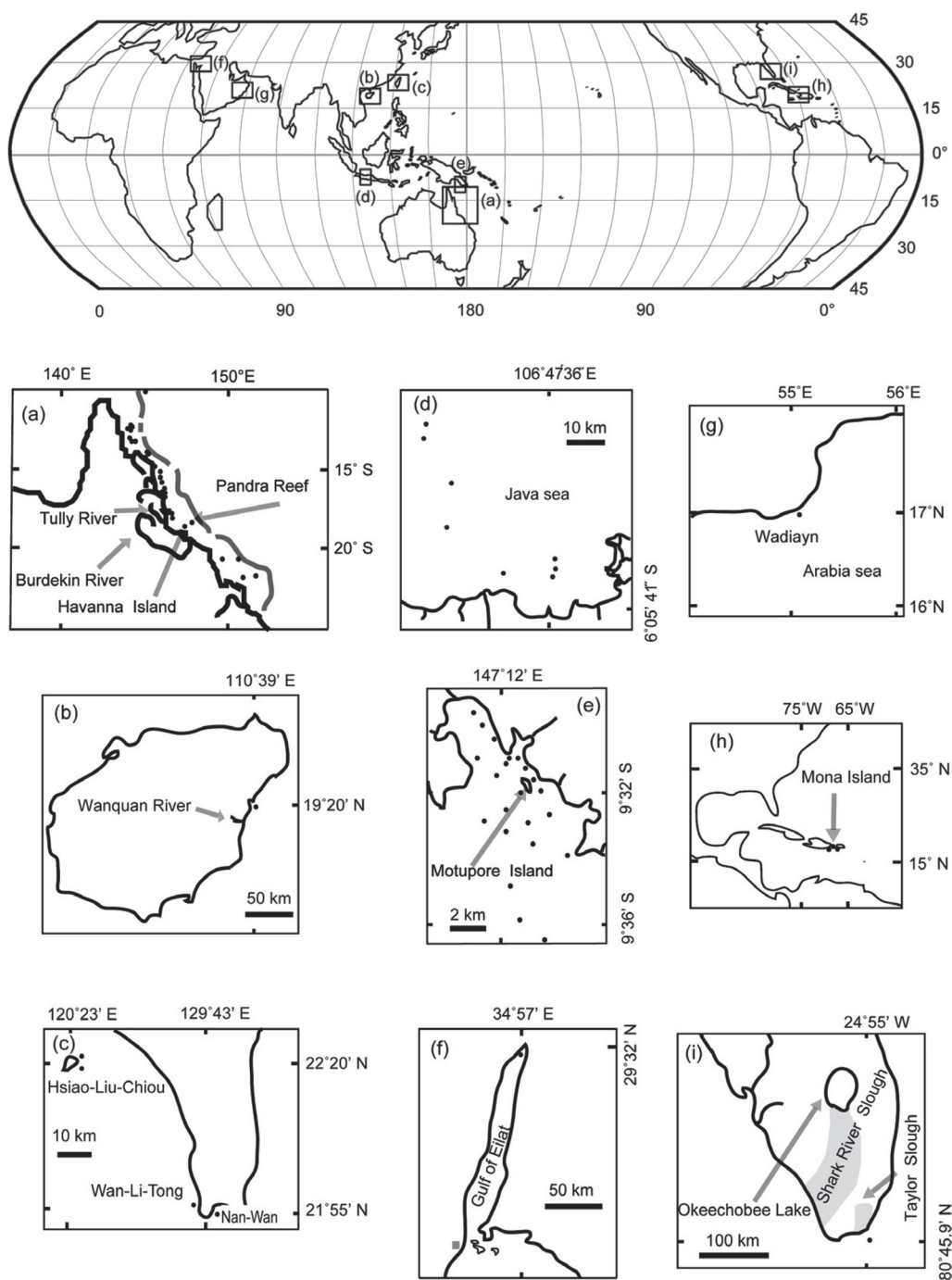


図 3 発光バンドを用いた古環境復元とその発光要因の研究 (表 1) に用いられたサンゴの主な採取地点 (a-i; (a) GBR (e.g. Lough et al. 2002), (b) Hainan Island (Peng et al. 2002) (c) Taiwan Island (Fang and Chou 1992), (d) Java Island (Scoffin et al. 1989), (e) New Guinea Island (Scoffin et al. 1989), (f) Sinai Peninsula (Klein et al. 1990), (g) Arabia Peninsula (Tudhope et al. 1996), (h) Around Mona Island (Nyberg et al. 2002; Nyberg et al. 2007), (i) Florida Peninsula (Smith et al. 1989)). 黒色の円は現生のサンゴを, 灰色の四角は化石サンゴを示す。Lough et al. (2002) と Scoffin et al. (1989) の図を一部改変

Fig. 3 Main locations of the studies of coral luminescent band for reconstructing the paleo-environment and resolving the cause of it listed in Table 1 (a-i; (a) GBR (e.g. Lough et al. 2002), (b) Hainan Island (Peng et al. 2002) (c) Taiwan Island (Fang and Chou 1992), (d) Java Island (Scoffin et al. 1989), (e) New Guinea Island (Scoffin et al. 1989), (f) Sinai Peninsula (Klein et al. 1990), (g) Arabia Peninsula (Tudhope et al. 1996), (h) Around Mona Island (Nyberg et al. 2002; Nyberg et al. 2007), (i) Florida Peninsula (Smith et al. 1989). Black circles and gray squares denote records from modern corals and fossil *Porites* spp. corals, respectively. Modified from Lough et al. (2002) and Scoffin et al. (1989)

北東部の8地点から採取したサンゴ骨格試料, それらの生息海域6地点および同海域に流入する河川9地点から採取した水試料, さらに陸域の7地点から採取した土壌試料のフミン酸(彼らの論文では, フミン酸とフルボ酸の2つをまとめて「フミン酸」としている)の含有量を測定した。その結果, 土壌は河川水よりも2~3桁程度, 河川水は海水よりも2~10倍程度, サンゴ骨格の黄緑色の蛍光バンド部位は青色の非蛍光バンド部位よりも1~3倍程度, フミン酸の含有量が多いことが示された。また, 陸から離れた海域で採取したサンゴには蛍光バンドがみられず, そのフミン酸量は陸側に近い海域から採取されたサンゴの非蛍光部分の含有量と同程度であることが報告された。

Fang and Chou (1992) は, 台湾南部の Nan-Wan, Wan-Li-Tong, Hsiao-Liu-Chiou の3地点からハマサンゴ属とキクメイシ属のサンゴをそれぞれ数群体採取し, 年輪ごとに試料を削りだし(時間分解能=1年/sample), 試料に含まれるフルボ酸の蛍光スペクトルを分析した。そして, サンゴが生育していた海域の海岸付近の砂に含まれていた土壌のフルボ酸の蛍光スペクトルの形状やピーク位置と比較した。その結果, サンゴ骨格中のフルボ酸は陸源性であることが判明した。その後, さらに, 各地点における1973~1985年の年間降水量とサンゴ骨格のフルボ酸の蛍光強度を比較した結果, 1975~1985年に原子力発電所の建設工事が行われていた Nan-Wan 地域で採取されたサンゴが, 蛍光バンド強度と年間降水量の相関が特に高かった($r=0.95$)。これは, 建設工事に伴い, 降雨による土壌流出が増加し, サンゴ骨格に大量のフルボ酸が取り込まれたためと推察される。

以上の研究結果から, サンゴ骨格は陸上起源の腐植物質(フミン酸やフルボ酸)を含んでおり, それらがサンゴ骨格の発光バンドの発光要因であると考えられる。一方, Tudhope et al. (1996) は隣接する陸域に河川が存在せず, 植生も乏しいオマーン沖に生息するハマサンゴから蛍光バンドが検出されたことから, 同地域のサンゴの蛍光バンドは陸源の腐植物質に起因しないと結論付けた。さらに, サンゴ骨格の酸素同位体比の変動から蛍光バンドの形成時期が湧昇期と関係していることを示し, 植物プランクトン等の海洋起源有機物に起因する可能性を指摘した。

Matthews et al. (1996) は, 大規模な流入河川が存在しないタイのプーケットでサンゴ骨格試料を採取し, その中に含まれるフミン酸(この研究では, フミン酸とフルボ酸を合わせてフミン酸としている)の蛍光スペクトルを3D-EEMスペクトルで分析することによって, そのフミン酸の起源を検討した。腐植物質の蛍光スペクトルは, 腐植物質を構成する有機物, 官能基等の情報を反映するため, 腐植物質の種類によって蛍光スペクトルのピークの数, 波長位置, 相対蛍光強度が異なる。したがって, サンゴ骨格中に含まれるフミン酸を定性・定量化するためには, 蛍光スペクトルピークの正確な位置やスペクトルの形状の違いを見分ける必要があることから, 励起波長, 蛍光波長, 蛍光強度を測定できる3D-EEMが有効である。彼らは, まず, サンゴ骨格に紫外線を照射したときに目視できる蛍光バンドと非蛍光バンド部位を削り出し, 有機物を抽出した液を調製した。そして, これと併せて, サンゴ骨格(固体のままの状態), サンゴ礁付近の海水(未処理のもの), 市販のフミン酸(陸源由来), tryptophan(紫外線照射により蛍光を示す芳香族アミノ酸), flavine(サンゴ礁に生息する底生生物が生産する小さな蛍光分子)の一種の riboflavin, pteridine の一種の isoxanthopterin, を準備し, 3D-EEMスペクトル分析を行った。その結果, サンゴ骨格から抽出した有機物や海水の蛍光スペクトルは, タンパク質由来である tryptophan 様の蛍光ピークおよび典型的な海洋の溶存態有機物の中のフミン酸の蛍光ピークを有するが, 陸源由来の市販のフミン酸の蛍光ピークを示さなかった。一方, サンゴ骨格の蛍光部位と非蛍光部位の3D-EEMスペクトルは, ピーク波長が同一であったことから, 蛍光バンドの色の違いは骨格が含有している蛍光物質の違いでは説明できなかった。さらに, サンゴや市販のフミン酸の溶液試料の分析結果からは, フミン酸の濃度やpHの違いによって蛍光スペクトルのピークの強度や位置が変化する内部フィルター効果や, tryptophan, riboflavin, isoxanthopterin といった小さい分子によって蛍光のエネルギー移動や消光作用が引き起こされることが定量的に示された。以上の結果より, 彼らは, これらの諸要素が発光バンドの色の違いを引き起こしている可能性がある」と指摘した。

発光要因~骨格構造と鉱物の性質~ 次に, 発光バ

ンドの発光要因に骨格構造や鉱物の性質が関与する
とした先行研究について紹介する。Barnes and
Taylor (2001a) は、サンゴ骨格に紫外線を照射し
たところ、骨格孔隙が紫外線の吸収や反射を複数回
起こすことにより発光強度が増幅されることを見出
し、発光バンドの発光要因が骨格の孔隙である可能
性を示した。つまり、骨格の孔隙が多いほど発光強
度が増すため、孔隙の多い低密度バンドの部位は孔
隙の少ない高密度バンドの部位よりも発光強度が高
いと推察された。しかしながら、発光バンドの幅が狭
い部位（彼らは発光ラインと呼称した）の発光要因
は明らかにされなかった。その後、Barnes and
Taylor (2005) は、サンゴ骨格の発光・非発光ライ
ンの各部位を粉末にして粒径毎に発光強度を分析し
た結果、発光ラインの部位は非発光ラインの部位よ
りも常に発光強度が高いものの、粉末の粒径が小さ
くなるにつれて発光強度は両者共に低下したため、
発光バンドや発光ラインの発光要因は骨格の孔隙の
多少だけでは説明できず、発光要因として炭酸塩鉱
物の粒径や圧密、化学組成などの違いも関与してい
る可能性がある」と指摘した。

先行研究の問題点と今後の検討課題

先行研究では、サンゴ骨格の発光バンドの強度を
解析する手法、例えば、使用する紫外線波長、発光
強度の定量化方法、励起波長や蛍光波長の選択、分
析前処理手法などが異なっているため（表1）、そ
れらの研究で報告された結果を直接比較することが
難しい。これが、発光バンドの発光要因を解明し、
降水や洪水の代替指標としての信頼性を高める上で
一つの障害となっている。本章では、これまでに紹
介した先行研究における問題点を指摘するとともに
に、発光バンドを用いた古環境復元研究の進展に必
要な課題を示す。

発光バンドの色、波長、強度

先行研究で報告された発光バンドの発光色は、黄
白、黄、黄緑、灰白色であり、文章による記述がほ
んどであった。近年、サンゴ骨格を用いた高時間分
解能の古環境復元研究では発光バンドをカラー画
像で示す報告がなされ始めたものの（例えば、Suzuki
et al. 2003; Mitsuguchi et al. 2008）、これらで見ら

れる発光・非発光バンドの色はほとんどが青白色と
青色であり、発光バンドの色（黄白色、黄色、黄緑
色、灰白色）をカラー画像で示すことができていな
い。

また、発光バンドの色（黄白、黄、黄緑、灰白）
と発光波長の関係性を見出した研究例も少ない。例
えば、Boto and Isdale (1984) は、黄緑色の蛍光バ
ンドと青色の非蛍光バンドの蛍光スペクトルを測定
し、両者の蛍光強度の差が蛍光波長 479~530 nm
で最大であることを見出したが、両蛍光バンドに対
応する骨格部位の 3D-EEM 分析により、発光バン
ドの色の違いを励起・蛍光波長の違いに基づいて説
明することはできなかった。このように、発光バン
ドの色と波長の関係が十分に明らかにされていない
ため、先行研究で用いられてきた発光バンドの励起
波長や発光波長（もしくは蛍光波長）は異なってい
り（表1）、発光バンドの波長分析は必ずしも統一
された分析手法で行われていない。

以上のように、サンゴ骨格の発光バンドの色と波
長の関係については、発光バンドの可視画像化も含
めて、さらなる基礎研究が必要である。特に、発光
バンドの発光要因を明らかにするためには、発光バン
ドの色をカラー画像で示し、同時に、それらの波長
を示すことが必要であると考えられる。

発光バンドと密度バンド

サンゴ骨格は高時間分解能の古環境復元が可能で
あるため、時間軸の正確な決定は重要である。これ
までサンゴ骨格に年代軸を入れる方法の一つとし
て、骨格の高密度と低密度のバンド1組を1年とす
る手法が用いられてきたが、近年、発光バンドを用
いた年代決定法も行われている（例えば、Scoffin
et al. 1992; Hendy et al. 2003; Nyberg et al. 2007;
Mitsuguchi et al. 2008）。しかしながら、発光バン
ドと密度バンドの形成要因および形成時期は異なる
可能性が指摘されているため、今後、発光バンドを
年輪として扱うためには、両者の関係を明らかにす
る必要がある。

これまで、サンゴの発光バンドと密度バンドの両
部位は概ね対応していることが明らかにされてきた
が、発光バンドの部位が高密度バンドもしくは低密
度バンドの部位のどちらと一致するかについては見
解が異なっている。Isdale (1984) は、初めてサン
ゴの蛍光バンドが降水や洪水に伴う河川流量の代替

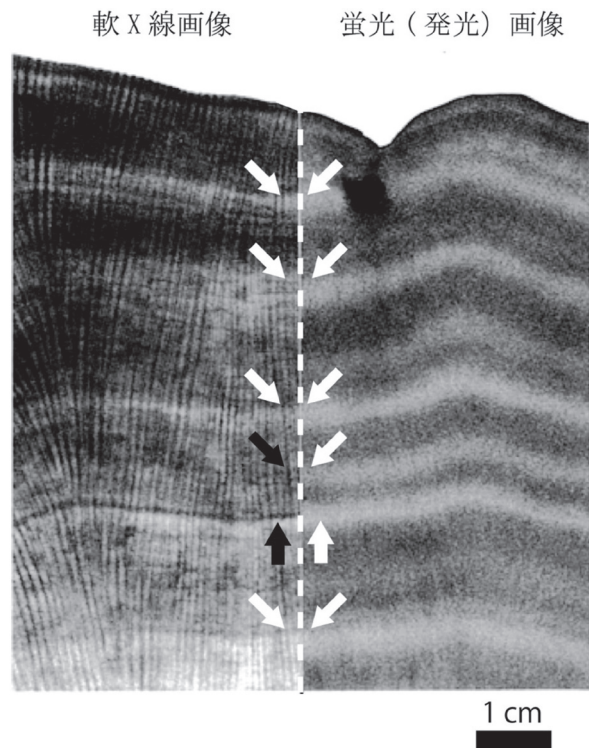


図 5 インドネシアで採取されたコブハマサンゴの軟 X 線画像 (左) と蛍光 (発光) 画像 (右)。大部分の「骨格の低密度部位 (明るい部位; 左図の白矢印)」と「蛍光部位 (明るい部位; 右図の白矢印)」は一致するが、一部の骨格の高密度部位 (暗い部位; 左図の黒矢印) と蛍光 (発光) 部位も対応している。Scoffin et al. (1989) の図を一部改変

Fig. 5 Comparison of X-radiographic (left) and fluorescence/luminescence (right) images of a coral *Porites lutea* collected at Indonesia. Although most of the skeletal low-density bands correspond to fluorescence bands, some parts of the skeletal high-density bands correspond to fluorescence bands. Modified from Scoffin et al. (1989)

指標となりうることを提唱し、同時に、蛍光バンドが軟 X 線画像で示される高密度バンドの部位と一致することを示した。一方で、Scoffin et al. (1989) は PNG とインドネシアのサンゴの蛍光バンドと密度バンドの比較をした結果、PNG の試料では低密度バンドと蛍光バンドの部位の位置が概ね一致しているものの、インドネシアの試料では幅が狭い高密度バンドと蛍光バンドの部位が一致していることを示した (図 5)。また、Klein et al. (1990) は化石サンゴの低密度バンドと蛍光バンドの部位が一致していることを報告した。

サンゴ骨格の蛍光バンドと密度バンドの形成時期の相違の要因の一つとして、それぞれの分析手法の違いが考えられる。蛍光バンドはサンゴ骨格試料の表面に紫外線を照射することによって現れるため、骨格表面の情報であると推定される。一方で、密度バンドは軟 X 線が透過する試料の厚み (約 3~10 mm) の平均情報として表される。すなわち、蛍光バンドは 2 次元、密度バンドは 3 次元の情報であり、両者を直接比較するには注意が必要である。したがって、サンゴ骨格の蛍光・非蛍光バンドの一对を年輪として用いる年代決定法の妥当性を検証するためには、骨格表面の空隙率と蛍光バンドを比較することが必要であり、そのためには、骨格表面の空隙率を定量化できる装置の開発が望まれる。

試料の前処理方法

サンゴの骨格構造は空隙が多く、骨格の中には、穿孔性生物である内石藻 (endolithic algae) やシアノバクテリアなどの生物の存在が報告されている (例えば、Durden 1902; Disalvo 1969; Bak and Laane 1987)。Lukas (1973) は、骨格内で年輪と平行に緑色を呈している部位には色素を有する内石藻が存在しているが、緑色部位が目視できない部分でも内石藻が観察されることを報告している。Carricart-Ganivet et al. (2007) は、骨格の空隙に存在する有機物を漂白剤で除去することによって、蛍光バンドの蛍光強度が最大で約 40% 低下することを示した (図 6)。つまり、骨格内には広い範囲で生物 (遺骸) が存在し、それらが骨格の蛍光バンドの色や蛍光波長に影響を及ぼす可能性があるため、注意が必要である。一方で、漂白前後の相対蛍光強度を比較すると、漂白後の蛍光強度のピーク位置が変化していることが示されたが、その理由は明らかにされていない。

これまでの蛍光バンドに関する先行研究は、骨格中に存在する穿孔性生物の有機物を考慮したかどうかの記述がない場合や、有機物の処理方法が研究者間で異なっている場合があった (表 1)。これらの違いは、研究結果の相比較・検討を困難にしておき、今後、サンゴの蛍光バンドを用いた古環境解析の信頼性評価と蛍光要因の解明に向けて、試料の前処理手法の統一化を目指すだけでなく、前処理による分析データの改変の度合いの定量評価を行う必要がある。

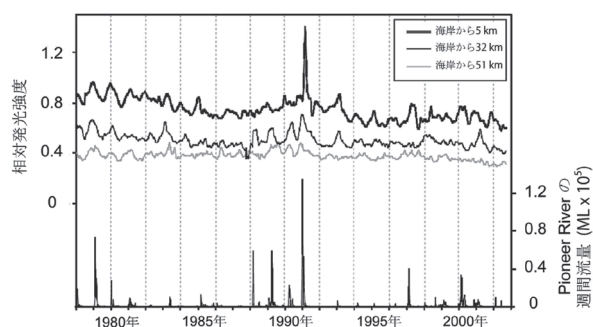


図 4 GBR 南部に注ぐ Pioneer River の河口域の海岸から 5 km, 32 km, 51 km 程度離れた地点で採取されたサンゴの発光バンドの相対強度と Pioneer River の週間流量 (メガリットル (ML) $\times 10^5$)。Jupiter et al. (2008) の図を一部改変

Fig. 4 Comparison of weekly Pioneer River discharge (Mega-liter (ML) $\times 10^5$) and relative luminescence intensity of corals collected from 5 km, 32 km, 51 km offshore. Modified from Jupiter et al. (2008)

サンゴ骨格中の腐植物質の存在形態

サンゴ骨格の蛍光スペクトルのピークは (表 1), 河川水や海水中のフルボ酸の蛍光波長 (410~460 nm) よりも高波長側に位置している (長尾 2008)。一方, 河川水や海水のフミン酸は, サンゴ骨格と同様の蛍光波長 (470-480 nm) (表 1) を有していることから, サンゴ骨格の蛍光はフミン酸の影響が大きいことが予想される。しかし, 海水中の溶存態有機物の中で大部分を占める腐植物質 (フルボ酸+フミン酸) の大部分はフルボ酸であり (平均=88%, 標準偏差=10%, $n=11$) (Harvey et al. 1983), 海水中的のフミン酸含有量はフルボ酸に比べて低い。また, 河川水においても, フルボ酸は平均 76% (標準偏差=17%) を占め, 海水と同様, フミン酸の含有量がフルボ酸に比べて低い (長尾 2008)。さらに, 溶液状態にして同じ重量濃度でフミン酸とフルボ酸の蛍光を測定した場合, フミン酸の蛍光の蛍光性は最大でもフルボ酸の 10% にすぎない (長尾 2007)。すなわち, 海洋溶存態有機物におけるフミン酸の存在量と蛍光特性を考慮すると, サンゴ骨格がフミン酸を選択的に濃集しない限り, サンゴ骨格の蛍光スペクトルを説明することができない。

しかしながら, いくつかの先行研究では, 河川からの距離が遠いほどサンゴの発光バンド強度が減少することが明らかにされてきており (図 4) (例えば,

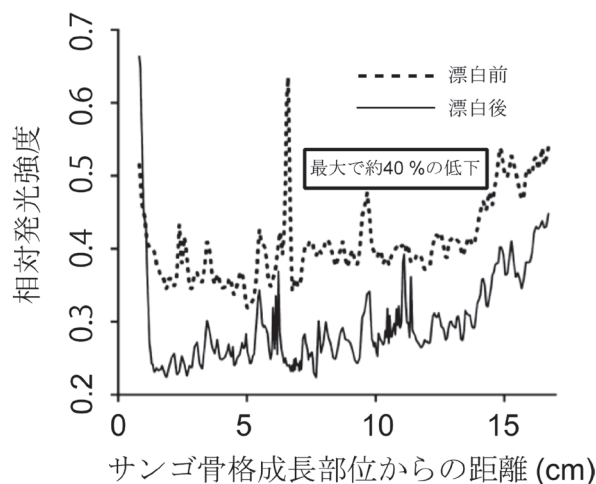


図 6 GBR で採取したサンゴについて次亜塩素酸ナトリウム (NaClO) で骨格中の有機物を漂白処理した前後のサンゴ骨格の発光バンド強度。発光バンド強度は, 励起波長 390 nm/ 蛍光波長 490 nm の相対蛍光強度を用いた。Carricart-Ganivet et al. (2007) の図を一部改変

Fig. 6 Comparison of relative luminescence intensity of a GBR coral before and after pretreatment (NaClO). The excitation/emission wavelength of 390 nm/490 nm was used. Modified from Carricart-Ganivet et al. (2007)

Scoffin et al. 1989; Lough 2007; Jupiter et al. 2009), 河川からの陸源有機物あるいは沿岸域の有機物が発光バンドの要因である可能性は否めない。

以上より, 今後は, フルボ酸・フミン酸をはじめとする腐植物質などの有機物が, サンゴ骨格中どのように取り込まれ, どのような形態で存在するかについて検討する必要があると指摘される。そして, 発光強度が有機物の濃度に規定されているのか, 種類や質の違いに規定されているのか, あるいはそれらのサンゴ骨格中での存在形態に依存しているのが理解できれば, サンゴ骨格の発光メカニズムが明らかにされるであろう。

サンゴの発光バンドを用いた古環境解析研究の今後の展望

数年から百年程度の時間スケールの気候変動は人間の社会生活や生態系へ大きな影響を与えることが知られており, その理解と予測は重要であるため, これまでに数多くの研究が行われている (例えば,

Meehl et al. 2007)。そのなかでも重要な研究手法の一つは、気象観測データから気候学的に記述される変動パターンを見つけることである。太平洋–インド洋域に限ってみても、これまでにエル・ニーニョ、南方振動、太平洋10年振動、インド洋振動など、様々な時空間スケールをもつ気候変動のパターンが見出されてきた（例えば、見延 2008; Trenberth et al. 2007; Saji et al. 1999）。今後、これらの気候変動のパターンのより詳細な理解と数値シミュレーションによって、全球の気温や降水量の分布が将来どのように変化するかを予測することが重要な課題である。しかし、降水量は気温と比べて時空間変動が大きいことから、地球温暖化に伴う降水量変動を予測するためには、数多くの地点における観測データが要求される（Burroughs 2001）。過去の降水量に関する情報を含む多数の高時間分解能の古気候データは、降水量の時空間的なデータの欠損を補うものとして大変有用である。特に、サンゴ骨格は温帯から熱帯の浅海域における様々な古気候情報を高時間分解能で有しており、その中でも発光バンドは年平均降水量や洪水による河川流量の突発的な増加を復元できる代替指標として注目されている。近年の分析機器技術の発展によって、発光バンド分析は簡便かつ迅速に行えるようになってきているため（例えば、Milne and Swart 1994; Barnes et al. 2003）、降水量変動を予測するために必要な、多くの地点における情報を取得可能という利点がある。今後、サンゴ骨格の発光バンドを用いた古環境解析は、前章までに述べたような多くの課題を解決することによって、気候変動に伴う降水量の経年変化を過去に遡って定量的に復元することを可能とし、大気水循環システムを理解する上で必要不可欠な基礎データ提供すると期待される。

謝辞

北海道大学大学院理学研究院技術部の池田昌隆氏、同理学研究院の中村隆志博士、海洋研究開発機構の飯島耕一氏、井尻暁博士、小栗一将博士、坂井三郎博士、高野淑識博士からは有意義な御助言を頂きました。また、匿名の2名の査読者ならびに名古屋大学大学院環境研究科の井龍康文教授には、本稿に対してきわめて貴重かつ有意義な御指摘をいた

しました。以上の方々に、この場をもって深く感謝いたします。

引用文献

- Bak RPM, Laane RWPM (1987) Annual black bands in skeletons of reef corals (Scleractinia). *Mar Ecol Prog Ser* 38: 169–175
- Barnes DJ, Taylor RB (2001a) Natural and artificial luminescence in a skeletal slice of *Porites*. *Coral Reefs* 19: 270
- Barnes DJ, Taylor RB (2001b) On the nature and causes of luminescent lines and bands in coral skeletons. *Coral Reefs* 19: 221–230
- Barnes DJ, Taylor RB (2005) On the nature and causes of luminescent lines and bands in coral skeletons: II. Contribution of skeletal crystals. *J Exp Mar Biol Ecol* 322: 135–142
- Barnes DJ, Taylor RB, Lough JM (2003) Measurement of luminescence in coral skeletons. *J Exp Mar Biol Ecol* 295: 91–106
- Boto K, Isdale P (1985) Fluorescent bands in massive corals result from terrestrial fulvic acid inputs to nearshore zone. *Nature* 315: 396–397
- Burroughs WJ (2001) *Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- Carricart-Ganivet JP, Barnes DJ (2007) Densitometry from digitalized images of X-radiographs: Methodology for measurement of coral skeletal density. *J Exp Mar Biol Ecol* 344: 67–72
- Carricart-Ganivet JP, Lough LM, Barnes DJ (2007) Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive *Porites* from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *J Exp Mar Biol Ecol* 351: 27–36
- Chalker BE, Barnes DJ (1990) Gamma densitometry for the measurement of skeletal density. *Coral Reefs* 9: 11–23
- DiSalvo LH (1969) Isolation of bacteria from the corallum of *Porites lobata* (Vaughn) and its possible significance. *Am Zool* 9: 735–740
- Duerden JE (1902) Boring algae as agents in the disintegration of corals. *Bull Am Mus Nat Hist*

- 16: 323-332
- Fang LS, Chou YC (1992) Concentration of fulvic acid in growth bands of hermatypic corals in relation to local precipitation. *Coral Reefs* 11: 187-191
- Harvey GR, Boran DA, Chesal LA, Tokar JM (1983) The structures of marine fluvic and humic acids. *Mar Chem* 12: 119-132
- Hendy EJ, Gagan MK, Lough JM (2003) Chronological control of coral records using luminescent lines and evidence for non-stationary ENSO teleconnections in northeast Australia. *Holocene* 13: 187-199
- Isdale P (1984) Fluorescent bands in massive corals record centuries of coastal rainfall. *Nature* 310: 578-579
- Isdale P, Kotwicki V (1987) Lake Eyre and the Great Barrier Reef: A paleohydrological ENSO connection. *J R Geogr Soc S Aust* 87: 44-55
- Isdale PJ, Stewart BJ, Tickle KS, Lough JM (1998) Palaeohydrological variation in a tropical river catchment: a reconstruction using fluorescent bands in corals of the Great Barrier Reef, Australia. *Holocene* 8: 1-8
- 石渡良志 (2008) 第1章: 自然界の腐植物質. 石渡良志・米林甲陽・宮島 徹 (編著) 日本腐植物質学会 (監修) 環境中の腐植物質—その特徴と研究法—, 三共出版株式会社, 東京, pp 2-9
- Jupiter S, Roff G, Marion G, Henderson M, Schrammeyer V, McCulloch M, Hoegh-Guldberg O (2008) Linkages between coral assemblages and coral proxies of terrestrial exposure along a cross-shelf gradient on the southern Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 27: 887-903
- Klein R, Loya Y, Gvirtzman G, Isdale PJ, Susic M (1990) Seasonal rainfall in the Sinai desert during the late quaternary inferred from fluorescent bands in fossil corals. *Nature* 345: 145-147
- Kotwicki V, Isdale P (1991) Hydrology of Lake Eyre, Australia: El Niño link. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 84: 87-98
- Lough JM (2007) Tropical river flow and rainfall reconstructions from coral luminescence: Great Barrier Reef, Australia. *Paleoceanography* 22: PA2218, doi: 10.1029/2006PA001377
- Lough JM, Barnes DJ, McAllister FA (2002) Luminescent lines in corals from the Great Barrier Reef provide spatial and temporal records of reefs affected by land runoff. *Coral Reefs* 21: 333-343
- Lukas KJ (1973) Taxonomy and ecology of the endolithic microflora of reef corals with a review of the literature on endolithic microphytes. PhD Dissertation, University of Rhode Island
- Mann ME, Gille E, Overpeck J, Gross W, Bradley RS, Keimig FT, Hughes MK (2000) Global temperature patterns in past centuries: an interactive presentation. *Earth Interactions* 4: 1-29
- Matthews BJH, Jones AC, Theodorou NK, Tudhope AW (1996) Excitation-emission-matrix fluorescence spectroscopy applied to humic acid bands in coral reefs. *Mar Chem* 55: 317-332
- Meehl GA, Stocker TF, Collins WD, Friedlingstein AT, Gaye AT, Gregory JM, Kitoh A, Knutti R, Murphy JM, Noda A, Raper SCB, Watterson IG, Weaver AJ, Zhao ZC (2007) Global Climate Projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor MMB, HL Miller (eds) *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp 747-846
- Milne PJ, Swart PK (1994) Fiber-optic-based sensing of banded luminescence in corals. *Appl Spectrosc* 48: 1282-1284
- 見延庄士郎 (2008) 第5章: 数年から100年スケールの海洋と大気の変動—海洋の短周期変動. 沢田健・綿貫 豊・西 弘嗣・馬渡峻輔 (編著) 地球の変動と生物進化—新・自然史科学2, 北海道大学出版, 札幌, pp 97-116
- Mitsuguchi T, Dang PX, Kitagawa H, Shibata Y (2008) Coral Sr/Ca and Mg/Ca records in Con Dao Island off the Mekong Delta: Assessment of their potential for monitoring ENSO and East Asian monsoon. *Glob Planet Change* 63: 341-352
- 長尾誠也 (2007) 第3, 4章: 蛍光分光分析. 渡辺

- 彰・藤嶽暢英・長尾誠也(編集)腐植物質分析ハンドブック—標準試料を例にして—, 三恵社, 名古屋, pp 51-57
- 長尾誠也(2008)第1章3節: 水中の腐植物質. 石渡良志・米林甲陽・宮島 徹(編著)日本腐植物質学会(監修)環境中の腐植物質—その特徴と研究方法—, 三共出版株式会社, 東京, pp 30-48
- Neil D, Isdale P, Newman S (1995) Coral skeletons as recorders of catchment history: Tully River, North Queensland, Australia. In: Bellwood O, Choat H, Saxena N (eds) Recent advances in marine science and technology 1994, James Cook University, Townsville, pp 279-287
- Nyberg J (2002) Luminescence intensity in coral skeletons from Mona Island in the Caribbean Sea and its link to precipitation and wind speed. Phil Trans R Soc Lond A 360: 749-766
- Nyberg J, Malmgren BA, Winter A, Jury MR, Kilbourne KH, Quinn TM (2007) Low Atlantic hurricane activity in the 1970s and 1980s compared to the past 270 years. Nature 447: 698-701
- Peng ZC, He X, Zhang ZF, Zhou J, Sheng LS, Gao H (2002) Correlation of coral fluorescence with nearshore rainfall and runoff in Hainan Island, South China Sea. Prog Natural Sci 12: 41-44
- Saji NH, Goswami BN, Vinayachandran PN, Yamagata T (1999) A dipole mode in the tropical Indian Ocean. Nature 401: 360-363
- Scoffin TP, Tudhope AW, Brown BE (1989) Fluorescent and skeletal density banding in *Porites lutea* from Papua New Guinea and Indonesia. Coral Reefs 7: 169-178
- Scoffin TP, Tudhope AW, Brown BE, Chansang H, Cheeney RF (1992) Patterns and possible environmental controls of skeletogenesis of *Porites lutea*, South Thailand. Coral Reefs 11: 1-11
- Smith TJ, Hudson JH, Robblee MB, Powell GVN, Isdale PJ (1989) Fresh-water flow from the everglades to Florida bay — a historical reconstruction based on fluorescent banding in the coral *Solenastrea bournoni*. Bull Mar Sci 44: 274-282
- Susic M, Boto KG (1989) High-performance liquid chromatographic determination of humic acid in environmental samples at the nanogram level using fluorescence detection. J Chromatogr 482: 175-187
- Susic M, Boto K, Isdale P (1991) Fluorescent humic acid bands in coral skeletons originate from terrestrial runoff. Mar Chem 33: 91-104
- Suzuki A, Gagan MK, Fabricius KE, Isdale PJ, Yukino I, Kawahata H (2003) Skeletal isotope microprofiles of growth perturbations in *Porites* corals during the 1997-1998 mass bleaching event. Coral Reefs 22: 357-369
- Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, Bojariu R, Easterling D, Klein Tank A, Parker D, Rahimzadeh F, Renwick JA, Rusticucci M, Soden B, Zhai P (2007) Observations: surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K, Tignor MMB, HL Miller (eds) Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, pp 235-336
- Tudhope AW, Lea DW, Shimmield GB, Chilcott CP, Head S (1996) Monsoon climate and Arabian sea coastal upwelling recorded in massive corals from southern Oman. Palaios 11: 347-361
- Wild FJ, Jones AC, Tudhope AW (2000) Investigation of luminescent banding in solid coral: the contribution of phosphorescence. Coral Reefs 19: 132-140

2009年7月31日 受領

2010年12月27日 受理

© 日本サンゴ礁学会

Review article

Coral skeletal luminescence - its causes and availability as a paleoenvironmental proxy

Kohki SOWA^{1,3,*}, Tsuyoshi WATANABE², Michiyo SHIMAMURA²,
Tatsuhiko SAKAMOTO³, and Seiya NAGAO⁴

¹ Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, N10W8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

² Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, N10W8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan

³ Institute of Biogeosciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, Japan

⁴ Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, 24 Wake, Nomi, Ishikawa 923-1224, Japan

* Corresponding author: K. Sowa

E-mail: sowa@mail.sci.hokudai.ac.jp

Communicated by Yasufumi Iryu (Geology and Physical Geography Editor)

Abstract The skeleton of massive reef-building corals records the past tropical-temperate environmental conditions in which they grow. Coral skeletal luminescence bands and/or lines irradiated by ultraviolet light have been used to investigate past precipitation and river flood. In pioneer studies involving investigation of coral luminescent bands, it was found that the distinct luminescent bands observed in coral annual bands were formed by coral aragonite, organic matters in coral skeletons especially humic substances, skeletal structure such as skeletal cavities. The results of several studies confirm that coral luminescent bands are derived from humic substances because the luminescent bands were more abundant in areas where humic substances were concentrated than in other skeletal parts and seawater. On the other hand, several studies have been shown that the coral luminescent bands correspond to the skeletal parts of low skeletal density. However, the cause of the formation of the luminescent bands still remains a controversial topic. Elucidating coral luminescent bands is essential for establishing reliable environmental proxies for reconstructing past precipitation and river flood events.

Keywords: coral skeleton, luminescent band, precipitation, river flood, humic substances, skeletal structure

Received: 31 July 2009/Accepted: 27 December 2010

© Japanese Coral Reef Society