

石西礁湖におけるミドリイシ属サンゴ一斉産卵の条件

藤原秀一^{1†}・毛塚大輔¹・石水秀延¹・田端重夫¹・野島 哲²Condition for mass spawning of scleractinian coral *Acropora* in the Sekisei Lagoon, Ryukyu IslandsShuichi FUJIWARA^{1†}, Daisuke KEZUKA¹, Hidenobu ISHIMIZU¹, Shigeo TABATA¹ and Satoshi NOJIMA²

琉球列島南部、石垣島と西表島間に位置する石西礁湖における造礁サンゴ、ミドリイシ属の一斉産卵の正確な時期を把握するため、産卵、浮遊する受精卵の带状集合（スリック）の観察日と満月からの経過日数との関係、及び観察日の積算水温、積算日射量を検討した。産卵は、5月の満月の3日前–2日後に多く観察された。ほとんどの産卵は、日没後1–4時間、また、満潮の1時間前–4.5時間後に起こった。すべての産卵は、5月に日平均水温が26°Cを超えるとき起こり、それは水温極値の2–3ヶ月前にあたった。一斉産卵の条件は、積算水温が 1.2×10^3 °C以上、積算日射量が 0.6×10^3 MJ·m⁻²以上と推定され、最も起こりやすい時期は5月の満月の夜及び満月付近の夜である。

To determine the accurate period for mass spawning of *Acropora* coral in the Sekisei Lagoon, Ryukyu Islands, the relationship between observations of spawning and slicks and lunar phase, as well as accumulated water temperature and solar radiation, was studied. Spawning was most often observed 3 days before to 2 days after the full moon in May. Most spawning occurred between 1 and 4 h after sunset and between –1.0 and 4.5 h of the high tide. All spawning occurred at a water temperature of 26°C in May, 2 to 3 months before the peak. The conditions of mass spawning in the Sekisei Lagoon was estimated to occur at a water temperature and solar radiation of $>1.2 \times 10^3$ °C and 0.6×10^3 MJ·m⁻², respectively. The most probable period of spawning is around and on the full moon in May.

Key words: *Acropora*, mass spawning, lunar phase, accumulated water temperature, accumulated solar radiation

はじめに

琉球列島南部に位置する西表島と石垣島の間には石西礁湖と呼ばれる、東西約20 km、南北約15 kmにわたるわが国最大規模のサンゴ礁海域があり、全域が西表石垣国立公園に指定されている。礁湖を形成するアウターリーフ、島を縁取る裾礁、点在する離礁等、複雑な地形が様々な環境の場を形成している。そこには、1998年の白化が起きる以前は、多様な造礁サンゴ（以下、サンゴ）の群集が生育していた。礁湖や礁池には枝状ミドリイシ群集、離礁には卓状ミドリイシ群集、アウターリーフの礁縁には卓状・コリンボース状ミドリイシ群集が卓越し、豊かなサンゴ礁生態系を作っていた。しかし、1998年と2001年の高水温によ

るサンゴ白化現象によって、サンゴ群集は大きく衰退した（環境省自然環境局沖縄奄美地区自然保護事務所・国土環境株式会社、2005）。

そのため、2002年、自然再生推進法の成立を機に、環境省により礁湖の自然再生事業が開始され、2006年から主として連結式サンゴ幼生着床具を用いたサンゴ種苗の移植が行われてきた。移植種苗は、サンゴ配偶体放出（以下、産卵）前にセラミック製着床具を海底に設置し、サンゴ幼生を効率的に着生させ（Okamoto et al., 2008）、海域での育成を経て、移植に供されている。また、採苗率の向上のため、産卵後、海面を浮遊する受精卵の带状集合（以下、スリック）を採集し、水槽で幼生に育成して、着床具に着生させる種苗生産も行われている（環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所、2013）。これらの作業を行ううえで、海域採苗では海底への適切な着床具設置時期、水槽採苗ではスリック採集時期を予測する必要がある。サンゴの産卵日を正確に知ることが求められる。石西礁湖で卓越し、一斉産卵するミドリイシ属の採苗が行われてきたが、

2014年5月15日受付、2015年7月10日受理

¹ いであ株式会社沖縄支社 〒900-0003 沖縄県那覇市安謝2-6-19 IDEA Consultants, Inc., 2-6-19 Aja, Naha, Okinawa 900-0003, Japan

² 〒863-2507 熊本県苓北町富岡1952-3

1952-3 Tomioka, Reihoku-machi, Kumamoto 863-2507, Japan

† E-mail: fjw20240@ideacon.co.jp

産卵が起きる条件については明らかとなっていない。

サンゴの産卵は、オーストラリアのグレート・バリア・リーフの一連の研究で注目を集めた。Harrison et al. (1984) は1981–1982年の観察で、多くの種が同時に産卵することを明らかにした。その後、Babcock et al. (1986) はイシサンゴ目105種の観察を行い、Harrison and Wallace (1990) が、イシサンゴ目の再生産についてまとめた。グレート・バリア・リーフでの多くの研究の結果、産卵は満月の4–5日後に起き (Harrison et al., 1984)、春季の満月から下弦の間の数夜に起きた (Babcock et al., 1986) などの知見が得られ、月齢が産卵に関する大きな要因であることが示された。

ミドリイシ属の産卵については、琉球列島阿嘉島周辺では、主に5–6月の満月の3日前–7日後に集中して起き (Hayashibara et al., 1993)、八重山諸島黒島では、ほとんどの種は5月の満月付近に集中して起こることが明らかにされた (御前, 1994)。石垣島でも、例年5月の満月付近に一斉に起こることが報告された (Suzuki et al., 2011)。ミドリイシ属の産卵は基本的に年1回であることが知られており (Hayashibara et al., 2004)、沖縄でも月齢に強く関係して産卵が起こる。多くのサンゴは、阿嘉島では日没後1.5–4時間の満潮頃に産卵し (Hayashibara et al., 1993)、黒島においても多くのミドリイシ属は夜間の満潮時に産卵した (御前, 1994)。

ミドリイシ属の種では雌雄同体・配偶体放出型の再生産様式を持ち、バンドルと呼ばれる配偶体のカプセルを一斉に放出する種内同調が知られている (Guest et al., 2010)。また、ミドリイシ属の多くの種が同調してバンドルを放出する種間同調もよく知られた現象である (下池, 1999; 服田・深見, 2004)。放出された卵と精子は受精後、スリックを形成し、海面を漂い (Guest et al., 2010)、翌朝には海岸付近でしばしば観察される (服田ら, 2003)。

月齢以外の産卵に関与する環境要因については、水温があげられる。阿嘉島では、水温が急速に上昇する5–6月にミドリイシ属の産卵が起きた (Hayashibara et al., 1993)。多種同調産卵に参加するミドリイシ属の卵黄蓄積に伴う生殖腺の成熟は、3月下旬ないし4月上旬から急速に進むことから、水温の上昇による影響が強いと考えられた (下池, 1999)。一方、水温変化の乏しいパラオでは、水温よりも日射との関係が示され、ミドリイシ属の産卵は年のうち日射が極値に近くなる時期に起こるとした (Penland et al., 2004)。

本研究では、石西礁湖において優占するクシハダミドリイシ、ハナバチミドリイシ、ハナガサミドリイシ、スギノキミドリイシ等を含むミドリイシ属の一斉産卵 (スリック) の観察 (潜水、自動カメラ) を行った。特に、自然採苗を目的とすることから、最初の一斉産卵を調べることに主眼をおき、産卵日と満月からの経過日数、積算水温、積算日射量の関係、産卵時刻と潮時や日没時刻との関係か

ら、産卵の起きる条件を検討した。

方法

調査海域

著者らが、1999–2012年にミドリイシ属の産卵やスリックを観察した海域 (Site A–O, Site 2沖)、既報やインターネット上で産卵・スリック情報を得た海域、環境省海洋観測ブイ (Site 1)、石垣港 (Site 2)、石垣島地方気象台 (Site 3) の位置を Fig. 1 に示した。調査地点の大半は礁湖内の水深10 m 以浅に位置している。

産卵、スリック調査

ミドリイシ属の産卵は、黒島では、4–8月の観察期間中、ほとんどの種は5月の満月付近に集中して起こり (御前, 1994; 御前, Personal Communication)、阿嘉島周辺では、5–8月の観察期間中、5–6月の満月付近に集中して起こったことから (Hayashibara et al., 1993)、観察期間を4–5月とした。観察時刻は、阿嘉島では日没後1.5–4時間の満潮頃に起こり (Hayashibara et al., 1993)、黒島においても多くのミドリイシ属は夜間の満潮時に産卵したことから (御前, 1994)、日没前から23時頃までをカバーした。

1999–2012年の4月下旬–5月上旬、Site E, G, I, J, K, N (Fig. 1) において、満月数日前からミドリイシ属の成熟状況の調査を行った。これは卓越するクシハダミドリイシ、ハナガサミドリイシ、コユビミドリイシ、タチハナガサミドリイシの群体の先端部を採取し、卵の成熟状況を調べる方法である。その結果を参考に、5月の満月前後3日間、日没前の17時頃から、約1時間ごとにミドリイシ属の産卵状況を潜水観察した。観察は、バンドルが莢から見えてきた段階からは、産卵まで連続して行った。産卵時刻はミドリイシ属のバンドルの放出されていた時間帯とした。潜水観察以外の期間は、自動撮影カメラによる撮影で産卵の確認を行った。2010–2012年の4月下旬–6月上旬、着床具に育ったサンゴを移植した Site N (Fig. 1) において、自動撮影カメラ (ペンタックス社製オプティオ WG1) を成熟したハナガサミドリイシ及びタチハナガサミドリイシの移植群体の近くに固定し、20–30分間隔で撮影した映像から産卵時期を調べた。

明瞭なスリックは産卵翌日には消滅することが多く、阿嘉港では午前10時頃以降には見られなくなり、外海においても翌々日には観察の機会が減少することが報告されていることから (服田ら, 2003)、産卵後の濃密な状態が保たれているスリックは観察日前日に産卵したとみなしてよい。そこでスリック観察は、早朝から昼頃までの航走によって、探索した。船上からの目視が主であるが、風向きによってはスリックの臭気も参考になる。記録対象は、目視で長さ数10 m 以上とした。調査は主に大潮の期間に行った。

なお、スリックのサンゴ相については、2009–2012年、

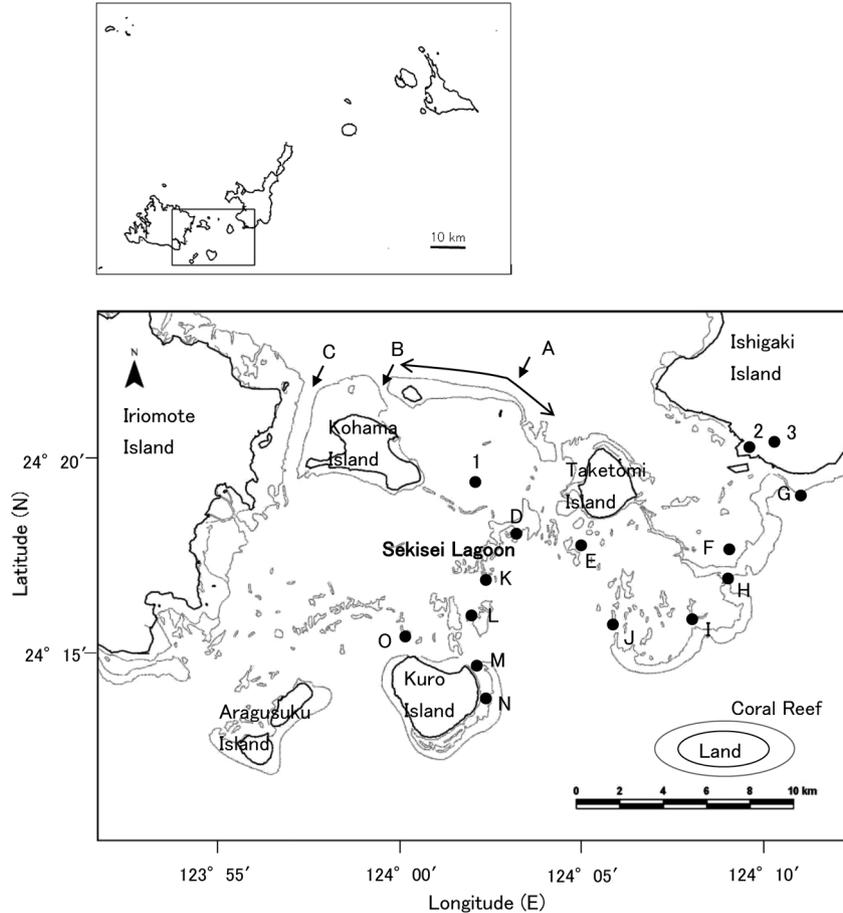


Figure 1. Study sites for mass spawning of *Acropora* coral. A: North Reef; B: Kayama Channel; C: Yonara Channel; D: Shimobishi; E: Milky Way; F: Asapie; F: Kanaraguchi; G: Sakuraguchi; H: Yuisaguchi; I: Uromagai; J: Katagua; K: Marugu; L; Urabishi; M: Off Anadomari; N: East Moat of Kuro Island, O: Off Kuro Island Port. Name of Facilities: 1: Oceanographic Observation Buoy of Ministry of the Environment; 2: Ishigaki Port; 3: Ishigakijima Local Meteorological Observatory.

採集スリックを水槽飼育し、着床具へ着生後の抽出観察で、着生サンゴの96%以上、平均99%がミドリイシ属であることを確認した（著者ら、未発表）。

産卵に関わる環境要因

産卵に関与するとされる環境要因には、月齢、水温、日射量、潮汐がある（Harrison and Wallace, 1990; Penland et al., 2004）。それらに日没時刻を加え、以下の方法でデータを求めた。

月齢は満月の日付を「こよみのページ」（<http://koyomi.vis.ne.jp/mainindex.htm>）で調べ、産卵日の満月からの経過日数を算出した。スリックについては観察前日までの経過日数を求めた。

積算水温は、環境省が2005年から石西礁湖の35ヶ所で計測したデータ（Onset. Hobo U22-001, 1時間ごと）から観測定点に近いものを用いた。積算は、下池（1999）が阿嘉島での解析に用いた3月1日以降、産卵日までの22°C以上の日平均水温の累積値によった。石西礁湖においても、

生殖腺の成熟は、阿嘉島と同様に4月頃から進むことが知られているためである（環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所, 2014）。

積算日射量についても積算水温と同様の考え方で、石垣島地方気象台のデータを気象庁のホームページ（<http://data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/>）から得て、3月1日から産卵日までの累積値を求めた。

潮汐は、石垣港のデータを気象庁（<http://data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/>）及び日本海洋データセンター（http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/tide_data.jp）のサイトから得た。

日没時刻は、石垣島のデータを「こよみのページ」から得た。

結果

産卵観察

2005年以降、観察地点において、石西礁湖で卓越するクシハダミドリイシの卵成熟状況を卵の色により5段階（0:

卵なし, 1: 白色, 2: 淡いピンク色, 3: ピンク色, 4: オレンジ色) で観察し, 評価した. その結果は以下の通りであった.

2005年: 観察地点の卵色平均値は3.0で, 卵の成熟は順調に進んでいた. 5月24日の満月までに産卵すると予想された.

2006年: 2005年と同様に, 卵の成熟は順調に進み, 平均値は3.0であった. 5月13日の満月付近で産卵すると予想された.

2007年: 平均値は1.4で, 卵の成熟度合いは小さかった. 5月2日の満月付近での産卵可能性は低く, 次の6月1日の満月付近と予想された.

2010年: 平均値は2.8で, 卵の成熟はほぼ順調であった. 5月28日の満月までに産卵することが予想された.

2011年: 平均値は2.9で, 2010年と同様にほぼ順調であった. 5月17日の満月付近で産卵することが予想された.

2012年: 平均値は1.0で, 卵の成熟度合いは小さかった. 5月6日の満月までに産卵する可能性は低いと予想された.

観察または自動カメラで得た産卵日や場所, その他の産卵に関わる環境要因を Table 1 に示す. 産卵はすべて5月の夜間に起きた. 満月の夜に産卵したのは3件, 満月前は3件 (3日前, 2日前, 1日前), 満月後は7件 (1日後2件, 2日後2件, 4日後2件, 9日後) であった. 2010年は満月の9日後に産卵を観察したが, それ以外は満月の3日前から4日後までに起きた. ヒストグラムからは, 満月の日が最も多かった (Fig. 2).

満潮時刻, 日没時刻と産卵時刻との関係を Figs. 3, 4 に示

Table 1. *Acropora* spawning days obtained by the field observations in the Sekisei Lagoon from 1999 to 2012.

No.	Date	Time	Site	Depth (m)	Spawned coral*	Nights before (–) or after full moon	Accumulated water temperature ($\times 10^3$ °C)**	Accumulated solar radiation ($\times 10^3$ MJ·m ⁻²)***
1	May 4, 1999	21:55 to 22:15	J	1 to 5	<i>A. hyacinthus</i> , <i>A. selago</i>	4	—	0.92
2	May 18, 2000	20:30 to 22:30	K	1 to 5	<i>A. florida</i> , <i>A. hyacinthus</i> , <i>A. vaughani</i>	0	—	1.19
3	May 19, 2000	21:30 to 22:30	I	1 to 2	<i>A. florida</i> , <i>A. nasuta</i> , <i>A. selago</i>	1	—	1.21
4	May 20, 2000	17:30 20:30 to 23:00	J	1 to 4	<i>A. tenuis</i> , <i>A. gemmifera</i> , <i>A. humilis</i> , <i>A. hyacinthus</i> , <i>A. nasuta</i> , <i>A. robusta</i> , <i>A. selago</i>	2	—	1.21
5	May 17, 2003	21:40	I	1 to 2	<i>A. selago</i>	1	—	1.29
6	May 21, 2005	22:05 to 22:10	J	1 to 4	<i>A. cytherea</i> , <i>A. formosa</i> , <i>A. humilis</i> , <i>A. hyacinthus</i> , <i>A. nasuta</i>	–3	1.80	1.23
7	May 24, 2005	22:30 (inferred)	G	3 to 8	Branching and Tabular <i>Acropora</i>	0	1.93	1.29
8	May 12, 2006	23:00 (inferred)	E	1 to 2	<i>A. hyacinthus</i>	–1	1.71	1.07
9	May 30, 2007	22:00	J	1 to 4	<i>A. formosa</i>	–2	2.22	1.41
10	May 7, 2010	22:30	N	4	<i>A. nasuta</i> transplanted (settled on May 2004)****	9	1.59	1.00
11	May 17, 2011	22:30	N	4	<i>A. nasuta</i> transplanted (settled on May 2004)****	0	1.29	1.13
12	May 8, 2012	22:40	N	2	<i>A. selago</i> transplanted (settled on May 2006)****	2	1.52	1.10
13	May 10, 2012	22:30	N	4	<i>A. nasuta</i> transplanted (settled on May 2004)****	4	1.57	1.12

*Species name is referred from Nishihira & Veron (1995) and Uchida & Fukuda (1988a, b).

**Daily mean water temperature over 22.0°C is accumulated from March 1 to the spawning day.

***Daily solar radiation is accumulated from March 1 to the spawning day.

****Spawning was recorded by automatically controlled camera.

†Hyphen in the table shows no data.

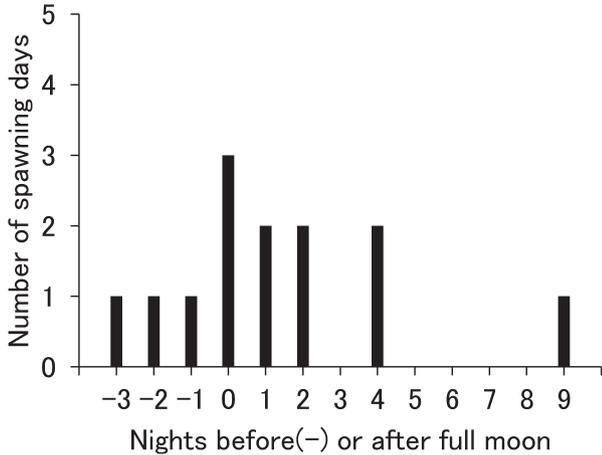


Figure 2. *Acropora* spawning dates before (-) or after full moon in the Sekisei Lagoon from 1999 to 2012. Data were recorded by field observation.

した。産卵時刻は、2000年5月20日のウスエダミドリイシ (*A. tenuis*) を除き、20:30–23:00で、満潮時の-1+4.5時間であった (Fig. 3)。また、日没からはウスエダミドリイシを除き、1.1–3.7時間であった (Fig. 4)。*A. tenuis* は他のミドリイシ属に先立ち、日没直後の17:30に産卵した。ここで用いた潮時は、石垣港 (Fig. 1, Site 2) の時刻で、石西礁湖の潮時とは若干異なる。石西礁湖北部の環境省海洋観測ブイ (Fig. 1, Site 1) の水位測定結果によれば、ブイ地点の潮時差は石垣港-8分15秒である (環境省那覇自然環境事務所・いであ株式会社, 2010)。

産卵と水温の関係は、1–5月までの日平均水温 (Fig. 5) と、積算水温 (Table 1) について示した。産卵はすべて26°Cに達した5月の満月付近に起きている。産卵日の水温が26°C以下であっても、産卵よりも前に26°Cを超えていた。積算水温は、 $1.29 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2011年) $-2.22 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2007年) であった。積算日射量 (Table 1) は、 $0.92 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (1999年) $-1.41 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (2007年) であった。

補足的データとして、石西礁湖黒島海域における、1991–1994年の産卵報告 (御前, 1994; 海中公園センター, 1995) 及び八重山サンゴ礁保全協議会 (<http://homepage3.nifty.com/sango-hozenkyou/>) の2005–2010年の産卵情報を著者らの観察結果に加えた満月からの経過日数を Fig. 6 に示した。産卵は、満月の日が最多 (5件) で、次いで満月後1日及び2日 (各4件) の順で多く、満月から2日後までが産卵の中心であった。満月の前と後を比較すると、満月の前 (6件) よりも満月の後 (17件) に産卵することのほうが多かった。最も早い産卵は満月前4日、最も遅い産卵は満月後9日であった。積算水温は $1.8 \times 10^3 - 2.0 \times 10^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ が最も多く (Fig. 7)、積算日射量については、 $1.0 \times 10^3 - 1.5 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ が顕著に多かった (Fig. 8)。

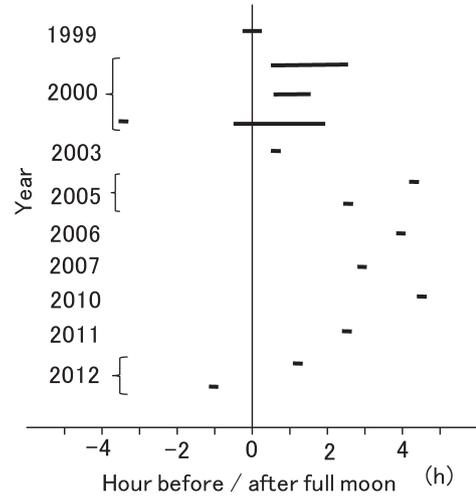


Figure 3. Relationship between high tide and spawning time obtained by observation. Y-axis shows hours from high tide (0). Bar indicates duration of spawning.

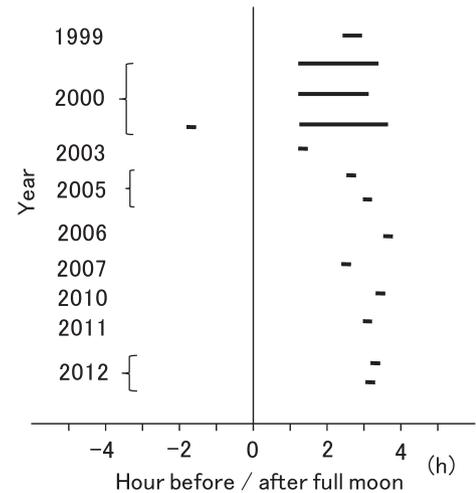


Figure 4. Relationship between sunset and spawning time obtained by observation. Y-axis shows hours from sunset (0). Bar indicates duration of spawning.

スリック観察からの産卵日

2003年から行ったスリック観察で求めた産卵日を Table 2 に示した。スリックが観察された場所は20海域で、石西礁湖の東部–南部にかけてみられた。産卵観察とは異なり、2007年、2009年、2012年では6月にも確認されたが、そのほかはすべて5月であった。2009年6月では、満月後5日、6日目に観察されたが、そのほかは、満月の6日前から2日後の間にみられた。スリック観察の前日に産卵があったと判断されるので、満月の夜の産卵は1件、満月の前は14件 (6日前1件、5日前1件、4日前2件、3日前3件、2日前4件、1日前3件)、満月の後は3件 (1日後1件、5日後1件、6日後1件) となる。最も多かったのは満月2日前

石西礁湖におけるミドリイシ属サンゴ産卵の条件

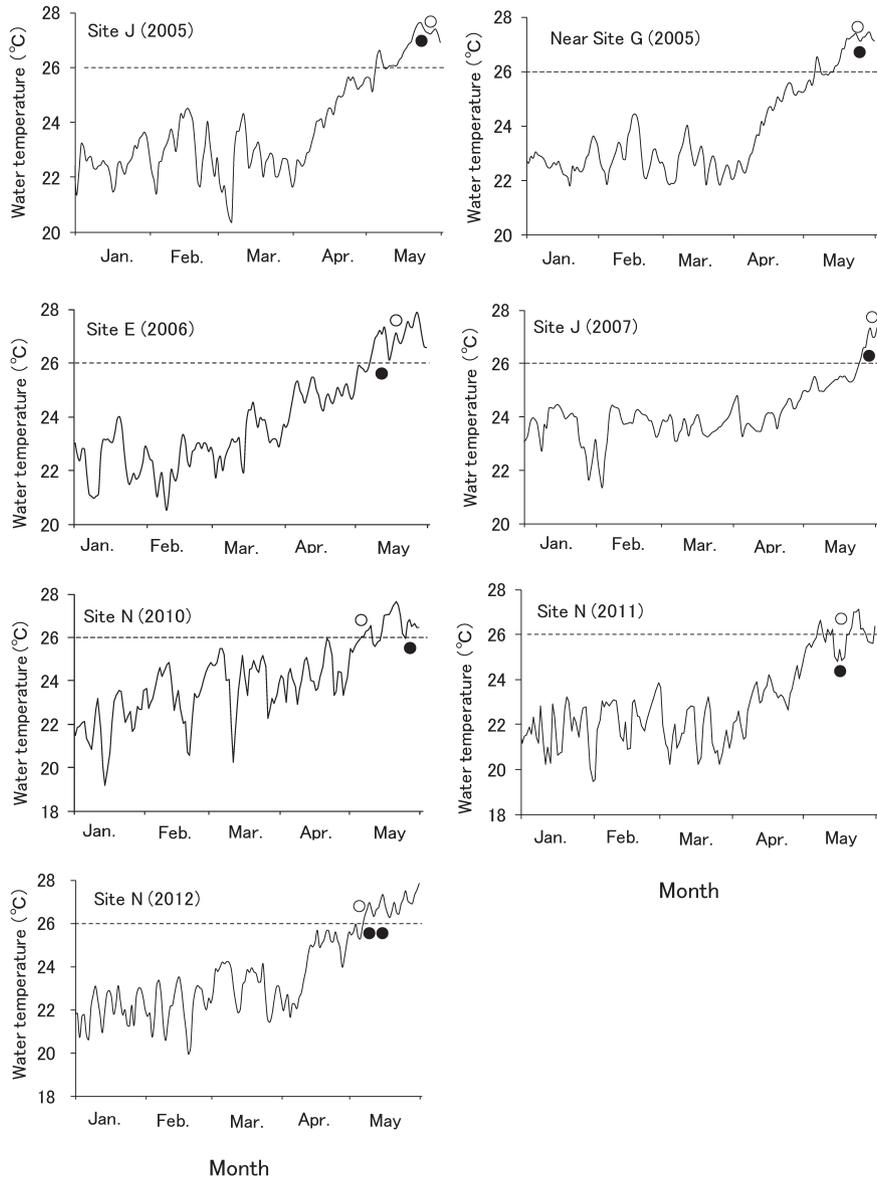


Figure 5. Mean daily water temperature between January and May. White circle: full moon day; Solid circle: spawning day.

(4件), 次いで3日前と1日前の各3件で, 満月3日前-1日前が大半を占めた (Fig. 9). 積算日射量は $0.63 \times 10^3 - 1.51 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ であった.

著者らの観察のほかに, 補足的データとして, 八重山サンゴ礁保全協議会の2008年と2010年のスリック観察情報 (<http://homepage3.nifty.com/sango-hozenkyou/>) をみると, 満月2日前と満月6日後の各1件があり, 観察情報を著者らのスリック観察結果に加えても, 満月2日前が最多で変わらなかった. 産卵の観察結果とは異なり, スリック観察からの産卵日は満月前の観察が多く, 満月以降の観察は少なかった.

積算日射量について, 著者らの観察に上述の観察情報を

加えたデータをまとめて, ヒストグラムで示すと (Fig. 10), $1.0 \times 10^3 - 1.5 \times 10^3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ が顕著に多かった.

考 察

産卵日の月齢

本研究では, 潜水観察や自動カメラによるミドリイシ属サンゴの産卵観察と, 産卵日の翌日に漂うスリックを指標とし, 産卵日の特定を行った. その結果, 産卵観察では, 満月の日から満月2日後までが産卵日の中心であった. これは, 産卵情報データを加えても変わらない. しかし, スリックで求めた産卵日は, 満月3日前から満月1日前が中心で, 満月前の産卵が主であった. スリック情報データを

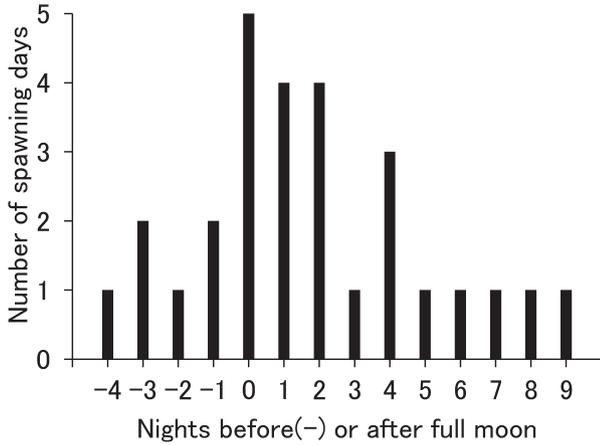


Figure 6. *Acropora* spawning dates before (-) or after full moon between 1991 and 2012 recorded by one field observation, published data, and website of the Sekisei Lagoon.

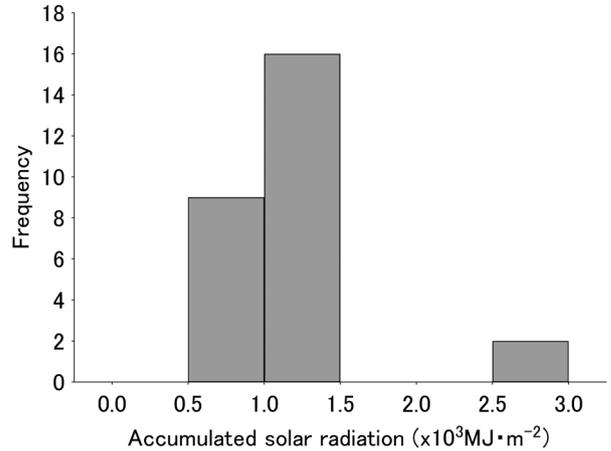


Figure 8. Frequency of accumulated daily solar radiation in Ishigaki from March 1 to the spawning day of *Acropora*. Frequency was obtained from field observations, published data, and website of the Sekisei Lagoon from 1991 to 2012.

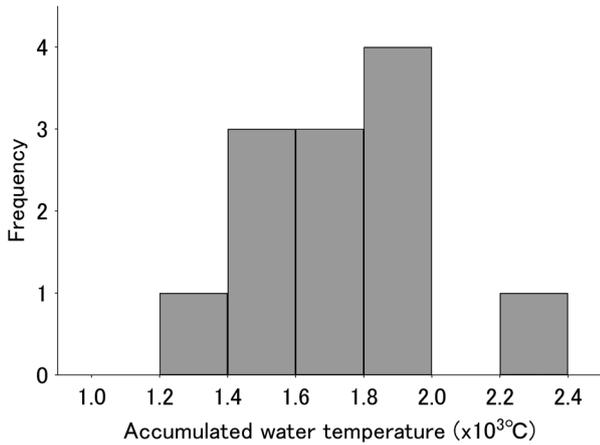


Figure 7. Frequency of accumulated water temperature in the Sekisei Lagoon from March 1 to the spawning day of *Acropora*. Daily mean water temperature over 26.0°C was used for accumulation. Frequency was obtained from both field observations and published data, and website of the Sekisei Lagoon from 1991 to 2012.

加えても同様であった。スリックは、産卵観察よりも早くから出現し、満月以降はほとんど確認できなかったことになる。この原因は、夜間の潜水よりもスリック調査が容易であること、また満月以降の産卵規模は、スリックを形成するほど大きくなかったことによると考えられた。石西礁湖でのミドリイシ属サンゴの産卵確認日 (Fig. 6) とスリックの確認前日 (Fig. 9) をまとめると (Fig. 11), 満月の3日前から満月1日後が産卵日の中心であった。

産卵時刻は多くのミドリイシ属で、日没後1-4時間で、潮時は満潮の-1+4.5時間であった。なお、ミドリイシ属の中には、早い時間帯に産卵する種があり、阿嘉島ではウスエダミドリイシと *A. donei* が18:00-20:30に産卵したと推

定され、この2種の産卵時刻が早いことは年により変わらないことが知られているが (服田・深見, 2004), 多くのミドリイシ属は日没後2-3時間に同調して産卵する (下池, 1999)。

高知県大月町に生息するサンゴ礁域と共通のミドリイシ属では、日没後2.5-3時間に主に産卵した (目崎ら, 2007)。徳島県海陽町ではエダミドリイシの産卵は、日没後2-4時間に行われた (岩瀬ら, 2009)。多くのミドリイシ属は、石西礁湖と同様に日没後2-4時間に産卵するといつてよい。

ミドリイシ属の産卵と月齢の関係については、オーストラリア東岸 Solitary 諸島 (30°S) の高緯度ミドリイシ科群集では、月齢との明瞭な関係はみられなかったとの報告もあるが (Wilson and Harrison, 2003)。石西礁湖ではミドリイシ属の産卵は月齢に強く関連していた。石西礁湖より緯度約2°北方 (26°11'N) の阿嘉島 (慶良間列島) では、ほとんどのミドリイシ属の産卵は満月の3日前から7日後に起こり (Hayashibara et al., 1993), 石西礁湖よりも産卵期間は短い。他の海域でのミドリイシ属の産卵は、ソロモン諸島 (9°S) では満月の3-5日後 (Baird et al., 2001), パラオ (7°N) では満月の6-7日後 (Penland et al., 2004), 仏領ポリネシア (17°30'S) では、満月の5-13日後 (Carroll et al., 2006) と、満月後の報告が多い。石西礁湖では満月前が中心で、それらと異なる結果を示した。その理由として、満月前に水温が26°Cに達したことが多かったことがあげられる (Fig. 5)。

産卵の季節

石西礁湖 (24°N) ではミドリイシ属の産卵は、水温が最も高くなる7-8月 (極値) よりも2-3ヶ月前の5月 (水温26°C以上) に起き、阿嘉島 (26°N) では水温が26°Cを超える

Table 2. Records of slick observation in the Sekisei Lagoon from 2003 to 2012.

Date	(Survey period)	Time	(Survey time)	Site	(Survey area)	Length	Nights before (-) or after full moon from previous day of observation	Accumulated solar radiation to previous day of observation ($\times 10^3$ MJ·m ⁻²)*
May 13, 2003	(May 13 to 14)	10:40	(08:00 to 12:00)	J	(South of Taketomi I.)	—	-4	1.21
May 13, 2003		14:50		I		—		
May 14, 2003		11:50		K		—	-3	1.24
May 19, 2005	(May 19 to 25)	09:30	(06:00 to 13:00)	D	(Between Ishigaki I. and Kuro I.)	100 m	-6	1.17
May 21, 2005		11:20		C		—	-4	1.20
May 22, 2005		13:40		M		—	-3	1.23
May 23, 2005		09:00 to 12:40		South of Taketomi I.		50–200 m	-2	1.25
May 23, 2005		10:20 to 11:15		H		—		
May 24, 2005		08:40 to 08:50		Outside of site 2		50–200 m	-1	1.28
May 9, 2006	(May 9 to 13)	10:15 to 10:20	(08:00 to 12:00)	F	(Between Ishigaki I. and Taketomi I.)	—	-5	0.96
May 9, 2006		10:25		East of Taketomi I.		—		
May 13, 2006		11:15		Outside of site 2		several hundred meters	-1	1.07
June 1, 2007	(May 15 to 16, 30 to June 2)	09:10	(08:00 to 16:00)	Off site 2	(Between Ishigaki I. and Aragusuku I., Between Kabiraishizaki and Urasoko Bay)	—	-1	1.43
June 1, 2007		09:40		L		—		
June 1, 2007		09:50		O		—		
June 1, 2007		09:55		Between Kuro and Aragusuku Is.		—		
June 1, 2007		10:15		South of Aragusuku I.		—		
June 1, 2007		11:05		West off Aragusuku I.		—		
June 1, 2007		11:55		Aragusuku I.		—		
June 1, 2007		15:30		O		—		
May 11, 2009**	(May 10 to 12)	08:00	(06:00 to 10:00)	Off site A	(Between Aragusuku I. and Taketomi I., Around Taketomi I., Off site A, Between Off site A and Oganzaki, Sakieda Bay and Nagura Bay)	several hundred meters	1	0.63
June 7, 2009	(June 7 to 10)	12:00	(07:30 to 16:00)	South of Aragusuku I.	(South of Iriomote I., Aragusuku I. and Kuro I.)	—	-2	0.94
June 14, 2009	(June 14 to 15)	08:00	(07:30 to 16:00)	Outside of site 2	(South reef of Sekisei Lagoon)	—	5	1.12
June 15, 2009		08:00		Outside of site 2		—	6	1.14
May 27, 2010**	(May 26 to 31)	07:22	(06:00 to 10:00)	Off site A	(Between Kuro I. and Taketomi I., Around Taketomi I., Off site A, Nagura Bay, Between site A and Oganzaki and Sakieda Bay)	—	-2	1.34
May 16, 2011**	(May 15 to 18)	06:47 to 08:23	(06:00 to 10:00)	Between Taketomi and Ishigaki Is., Off site A	(Around Taketomi I. Nagura Bay, Off site A, Between site A and Oganzaki and Sakieda Bay)	over 100 m	-2	1.10
May 7, 2012**	(May 4 to 10, 17 to 22, 24 and June 1 to 3)	08:30	(06:00 to 10:00)	East of Taketomi I.	(Around Taketomi I. Nagura Bay, Off site A, Between site A and Oganzaki)	100 m	0	1.05
June 2, 2012**		around 08:30		West of Taketomi I.		over 100 m	-3	1.51

*Daily solar radiation is accumulated from March 1 to previous day of slick observation.

**Coral larvae from slick were collected and reared in the tank where CSD was deployed for their settlement. Most larvae was confirmed as *Acropora* after settlement on CSD.

†Hyphen in the table shows no data.

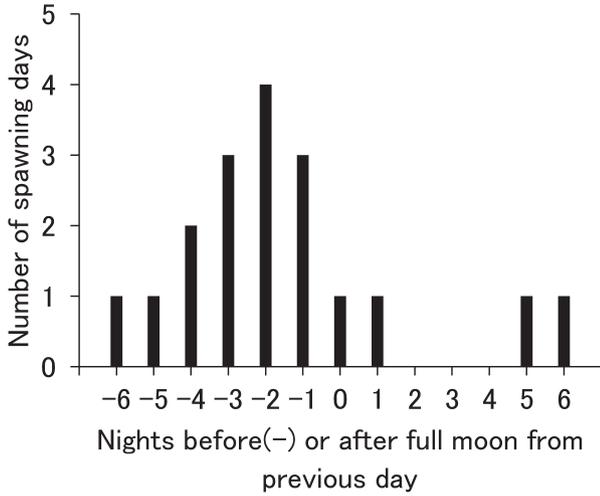


Figure 9. *Acropora* spawning dates before (-) or after full moon between 2003 and 2012 inferred by field observations in the Sekisei Lagoon. Slick was assumed to appear the day after spawning.

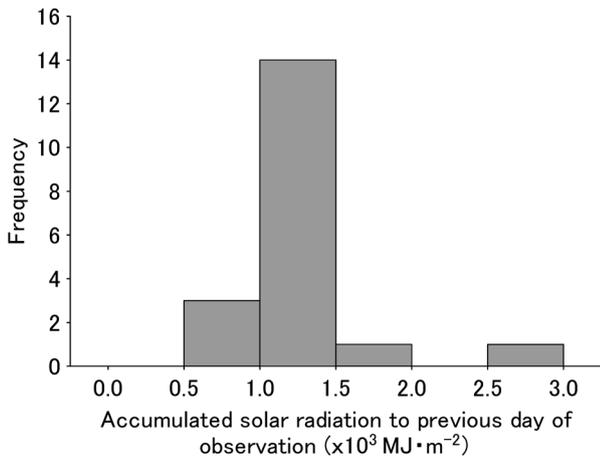


Figure 10. Frequency of accumulated daily solar radiation in Ishigaki from March 1 to the spawning day of *Acropora*. Frequency was obtained from field observations, published data, and website of the Sekisei Lagoon from 2003 to 2012.

5月下旬-6月下旬に産卵が起き (Hayashibara et al., 1993), これらの年の水温の極値の1-2ヶ月前であった。石西礁湖よりも約1ヶ月遅れる。四国西南部の大月町 (32°46'N) では、石西礁湖より約3ヶ月遅れの8月に起きた。産卵期の水温 (27.5°C) は極値の時期であった (van Woessik, 1995)。産卵の遅れは、緯度が増加するに伴い水温の上昇が遅れることと関係があるが、日本におけるミドリイシ属の産卵適温は26°C以上と考えられる (Baird et al., 2009a)。仏領ポリネシア (17°30'S) でも水温が極値になる3月よりも、5ヶ月前-3ヶ月前の水温上昇期 (26°C以上) に産卵が起きた (Caroll et al., 2006)。積算水温についてみると、石西礁湖

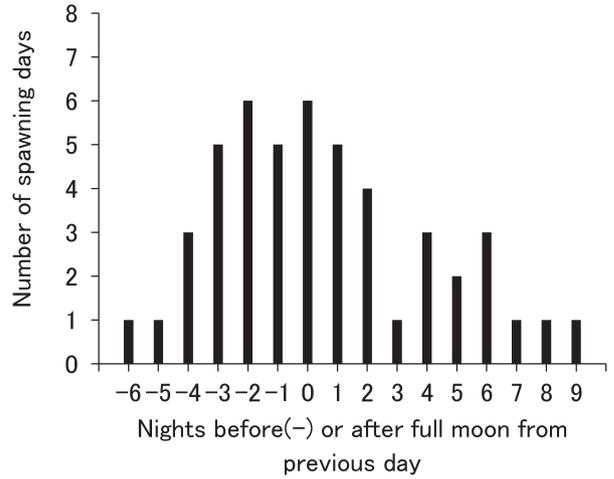


Figure 11. Frequency of *Acropora* spawning dates before (-) or after full moon from spawning and slick data in the Sekisei Lagoon from 1991 to 2012.

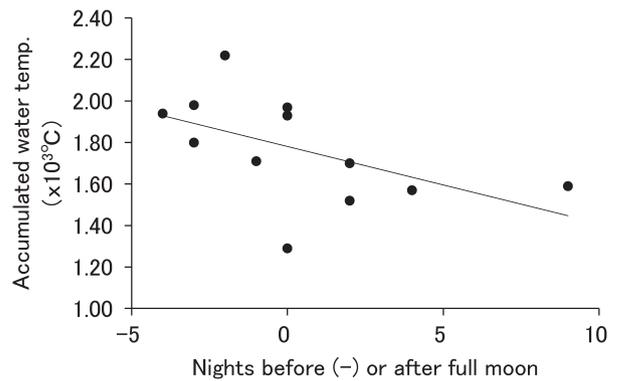


Figure 12. Relationship between spawning nights before (-) or after full moon and accumulated water temperature.

では、 $1.2 \times 10^3 \text{°C}$ を超える5月頃である。水温は4月頃から急速に上昇を始め、これが生殖細胞の成熟を促すと考えられている (Babcock et al., 1986)。積算水温と産卵時期の関係を見ると、積算水温が高いほど満月に対する日数が若くなる傾向がわずかに認められる (Fig. 12)。この傾向は、阿嘉島においても認められている (下池, 1999)。

一方、赤道付近のパラオ (7°19'N) では、日射年変動に伴う極値への上昇期と極値からの下降期に産卵が起こった。パラオでは水温の年変動は少なく (約2.5°C)、水温よりも日射の変化に関係するとされている (Penland et al., 2004)。石西礁湖では極値からの下降期の産卵については明らかでない。赤道付近のケニア (4°S 付近) では水温が最高を示す1-3月にミドリイシ属の主な産卵があったが (Mangubhai and Harrison, 2006)、赤道に近づくにともない、水温年変動が少なくなるため、産卵の季節性は減少する傾向がある (Oliver et al., 1988)。

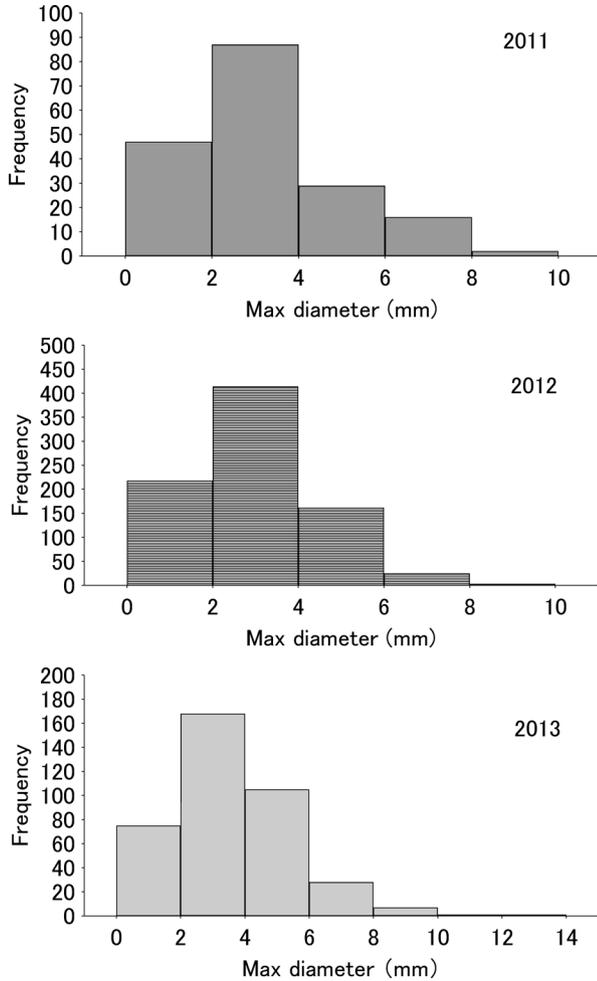


Figure 13. Frequency of max diameter of settled coral on the Coral Settlement Devices (CSD). CSD has deployed on the reef bottom every April for producing coral seedlings and sampled 2% every December for estimating coral settlement. Max diameter has been measured for all CSDs used for sampling.

積算日射量については、パラオにおける産卵報告 (Penland et al., 2004) で、水温変化が少ない熱帯海域においては水温よりも日射に強く影響され、日射の極値付近 ($5.0\text{--}6.0 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) と一致する。しかし、パラオのような海洋性気候と異なり、石西礁湖は大陸の縁辺に位置するため、中国大陸の気団と太平洋の気団の間で雲が発生しやすく、極値では、日射の影響を求めることはできない。日射が産卵に及ぼす影響を明らかにするためには、今後積算日射量で検討する必要がある。

一斉産卵

大規模産卵を、一夜の薄暮から深夜における多種サンゴの配偶体一斉放出 (Harrison and Wallace, 1990) とすると、石西礁湖のミドリイシ属の産卵は、それに該当しない。大規模産卵を、限られた季節の限られた月齢に産卵し、スリック

の発生がみられることを一斉産卵とすると、石西礁湖では、積算水温が $1.2\times 10^3\text{ }^\circ\text{C}$ 、積算日射量が $0.6\times 10^3 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ を超えると、この条件に合致する。そしてこの条件に達するのは、5月の満月及び満月前後の夜である。

産卵は 26°C に達した後に起こるため、5月以前には稀と考えられる。石西礁湖南部での観察によれば、4月の満月付近では産卵は観察されず、5月の満月で産卵が観察されている (Okamoto et al., 2008)。6月以降の産卵については、毎年4月に設置した着床具の8ヶ月後抽出 (2011年: 685個, 2012年: 874個, 2013年: 741個) における着床サンゴ群体の長径ヒストグラムが単峰型であることから、仮に一斉産卵があったとしても、規模が小さいであろうことが示唆される (Fig. 13)。

近年のグレート・バリア・リーフにおける研究では、ほとんどのミドリイシ属で産卵期前、群体の部分により成熟状態が異なり、その状態は2ヶ月以上にわたる。また、産卵時期の制御には様々な環境要因が関わるが、月齢による産卵同調は多くの研究で支持されている (Baird et al., 2009b)。

以上、本研究では、サンゴ礁再生に用いる移植種苗生産のための採苗条件として、最初の産卵が起きる月齢、水温、日射について明らかにした。これらの情報は、種苗生産の効率化に資することが期待される。

謝辞

環境省の石西礁湖自然再生事業支援専門委員会 (委員長: 土屋 誠琉球大学名誉教授) 及び国際サンゴ礁研究・モニタリングセンター職員の皆さんには様々な支援をいただいた。また、元串本海中公園センターの御前 洋氏からは有益な情報を提供していただいた。これらの方々に深く感謝したい。本研究は一部、環境省の「石西礁湖自然再生事業」における調査データを用いて行った。

引用文献

- Babcock, R. C., G. D. Bull, P. L. Harrison, A. J. Heyward, J. K. Oliver, C. C. Wallace and B. L. Willis (1986) Synchronous spawning of 105 scleractinian coral species on the Great Barrier Reef. *Mar. Biol.*, **90**, 379–394.
- Baird, A. H., C. Saddler and M. Pitt (2001) Synchronous spawning of *Acropora* in the Solomon Islands. *Coral Reefs*, **19**, 286.
- Baird, A. H., C. L. Birrel, T. P. Hughes, A. McDonald, S. Nojima, C. A. Page, M. S. Prachett and H. Yamasaki (2009a) Latitudinal variation in reproductive synchrony in *Acropora* assemblages: Japan vs. Australia. *Galaxea, J. Coral Reef Stud.*, **11**, 101–108.
- Baird, A. H., J. R. Guest and B. L. Willis (2009b) Systematic and biogeographical patterns in the reproductive biology of Scleractinian corals. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **40**, 551–571.
- Carroll, A., P. Harrison and M. Adjeroud (2006) Sexual reproduction of *Acropora* reef corals at Moorea, French Polynesia. *Coral Reefs*, **25**, 93–97.
- Guest, J., A. Heyward, M. Omori, K. Iwao, A. Morse and C. Boch (2010) Rearing coral larvae for reef rehabilitation. In: Reef rehabilitation

- manual, ed. A. J. Edwards, pp. 73–98.
- Harrison, P. L., R. C. Babcock, D. B. Gordon, J. K. Oliver, C. C. Wallace and B. L. Willis (1984) Mass spawning in tropical reef corals. *Science*, **223**, 1186–1189.
- Harrison, P. L. and C. C. Wallace (1990) Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. In: *Coral Reefs, Ecosystems of the World 25*, ed. Z. Dubinsky, pp. 133–207.
- 服田昌之・岩尾研二・谷口洋基・大森 信 (2003) 有性生殖を利用したサンゴ礁修復。「サンゴ礁修復に関する技術手法—現状と展望—」大森 信編著, 環境省自然環境局, 13–25.
- 服田昌之・深見裕伸 (2004) ミドリイシサンゴにおける産卵タイミングと生殖隔離. *みどりいし*, **15**, 23–25.
- Hayashibara, T., K. Shimoike, T. Kimura, S. Hosaka, A. Heyward, P. Harrison, K. Kudo and M. Omori (1993) Patterns of coral spawning at Akajima Island, Okinawa, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **101**, 253–262.
- Hayashibara, T., K. Iwao and M. Omori (2004) Induction and control of spawning in Okinawan staghorn corals. *Coral Reefs*, **23**, 406–409.
- 岩瀬文人・中野 晋・安藝浩資・岡田直也・清水里香 (2009) エグミドリイシの有性生殖による増殖法に関する現地試験. *土木学会論文集B2 (海岸工学) B2-65(1)*, 1216–1220.
- 海中公園センター (1995) 平成6年度サンゴ礁生態系の復元手法に関する研究報告書, 87 pp.
- 環境省自然環境局沖縄奄美地区自然保護事務所・国土環境株式会社 (2005) 平成16年度石西礁湖自然再生技術手法検討調査報告書, 153 pp.
- 環境省那覇自然環境事務所・いであ株式会社 (2010) 平成21年度石西礁湖サンゴ礁保全総合調査業務報告書, 371 pp.
- 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所 (2013) 平成24年度石西礁湖自然再生施設サンゴ群集修復工事監理等業務報告書, 138 pp.
- 環境省九州地方環境事務所那覇自然環境事務所 (2014) 平成24年度(繰越)石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査等業務報告書, 354 pp.
- Mangubhai, S. and P. L. Harrison (2006) Seasonal patterns of coral reproduction on equatorial reefs in Mombasa, Kenya. *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, 106–114.
- 目崎拓真・林 徹・岩瀬文人・中地シュウ・野澤洋耕・宮本麻衣・富永基之 (2007) 高知県大月町西泊におけるイシサンゴ類の産卵パターン. *Kuroshio Biosphere*, **3**, 33–47.
- 御前 洋 (1994) 黒島におけるイシサンゴ類の産卵状況. *マリンパピリオン*, **23**, 4–5.
- 西平守孝・J. E. N. Veron (1995) 「日本の造礁サンゴ類」. 海游舎, 439 pp.
- Okamoto, M., S. Nojima, S. Fujiwara and Y. Furushima (2008) Development of ceramic settlement devices for coral reef restoration using *in situ* sexual reproduction of corals. *Fish. Sci.*, **74**, 1245–1253.
- Oliver, J. K., R. C. Babcock, P. L. Harrison and B. L. Willis (1988) Geographic extent of mass coral spawning: clues to ultimate causal factors. *Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium, Australia, 1988, Vol. 2*, 803–810.
- Penland, L., J. Klouelechad, D. I dip and R. Woesik (2004) Coral spawning in the western Pacific Ocean is related to solar insolation: Evidence of multiple spawning events in Palau. *Coral Reefs*, **23**, 133–140.
- Rinkevich, B. (1989) The contribution of photosynthetic products to coral reproduction. *Mar. Biol.*, **101**, 259–263.
- 下池和幸 (1999) 慶良間列島阿嘉島において新たに確認されたイシサンゴ類の産卵と産卵パターン. *みどりいし*, **10**, 29–31.
- Suzuki, G., S. Arakaki and T. Hayashibara (2011) Rapid *in situ* settlement following spawning by *Acropora* corals at Ishigaki, southern Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **421**, 131–138.
- 内田絃臣・福田照雄 (1988a) 「沖縄海中生物図鑑 第9巻 サンゴ」. (財) 海中公園センター監修, 新星図書出版, 240 pp.
- 内田絃臣・福田照雄 (1988b) 「沖縄海中生物図鑑 第10巻 サンゴ」. (財) 海中公園センター監修, 新星図書出版, 246 pp.
- van Woesik, R. (1995) Coral communities at high latitude are not pseudo-populations: Evidence of spawning at 32°N, Japan. *Coral Reefs*, **14**, 119–120.
- Wilson, J. R. and P. L. Harrison (2003) Spawning patterns of scleractinian corals at the Solitary Islands: A high latitude coral community in eastern Australia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **260**, 115–123.