

沖縄・慶良間列島におけるサンゴ産卵とスリック動態に関する観測

灘岡 和夫* ・波利井佐紀** ・池間 健 晴*** ・Enrico Paringit****
三井 順*****・田村 仁*****・岩尾 研 二*****・鹿熊信一郎*****

造礁サンゴ類は有性生殖を行い、幼生を分散させる。産卵のタイミングは、幼生が分散時に受ける流れを決定し、定着範囲を変えるため重要である。本研究では、慶良間列島周辺海域において、サンゴの産卵日とその後、形成されるスリック(卵・幼生の帯状集合体)の動態を空間的に把握し、スリックが短期間で形成-消失-再形成しながら、大域的に分散することを明らかにした。さらに、産卵のタイミングを規定する要因として水温変動を把握し、水温環境が月程度の時間スケールで産卵を支配するだけではなく、日スケールでの産卵日の決定要因の1つとしても重要であることを示した。

1. はじめに

サンゴ礁に生息する造礁サンゴ類は、有性生殖による幼生の浮遊期をもっており、幼生を分散させることによって個体群を維持・拡大させている。近年、地球規模環境や地域的な環境の悪化により、サンゴ礁は破壊や死滅が危惧されており、ダメージを受けた礁の回復にとっても、サンゴ幼生の加入が期待されている。

造礁サンゴ類の多くは、卵と精子(バンドル)を海中に一斉に放出する“放卵放精型”とよばれる繁殖様式を持ち、グレートバリアリーフや紅海、琉球列島などでは、多少の地域差はあるものの、年に1回、満月前後の夜、数日間で一斉に産卵する(Harrison ら, 1984; Shlesinger and Loya, 1985; Harrison and Wallace, 1990; Hayashibara ら, 1993)。産卵後、卵は浮力物質となる脂質を多く含むため海面に浮上し(Arai ら, 1993)、時にはスリックとよばれる帯状集積帯を形成して、海面を数百m〜数kmにわたり漂う(Oliver and Willis, 1987; Willis and Oliver, 1990)。その後、受精卵は発生を繰り返してプラヌラ幼生となり、幼生は一定期間、海中を分散した後、海底へと定着、加入する。特に、産卵のタイミングは、その後、プラヌラ幼生が分散時に受ける物理環境(主として流れ)を決定し、加入先を変えるため重要となる。

産卵を決定する要因として、産卵時期(季節)では水温や日の長さが、産卵の月や日の時間スケールでは水温や月齢周期が、産卵時間スケールでは日没からの時間や潮汐の影響が考えられている(例えば、Babcock ら, 1986;

Hayashibara ら, 1993; Harrison and Wallace, 1990)。産卵日は、地域内や種内/種間で数日異なることが観察されており、その要因については、水温や光量の違いや産卵を同調させるケミカルシグナル等があげられている(Shimoike ら, 1992; Hayashibara ら, 1993)。しかし、現在のところ、近隣のサンゴ礁間での産卵日の違いに関しては、その要因は明らかではない。

本研究では、沖縄本島西方に位置する慶良間列島において、造礁サンゴ類の産卵日と、その後形成されるスリックの動態を空間的に把握することを試みた。また、産卵のタイミングを規定する要因を明らかにするため、卵の成熟に重要な水温変動に着目し、沿岸水温をモニタリングし、地域内での水温変動と産卵日の関係を明らかにすることを試みた。沖縄周辺海域では、これまでに5月〜9月にかけてサンゴの産卵が確認され、このうち、大規模な産卵は5月または6月に観察されている(Heyward ら, 1987; Hayashibara ら, 1993)。なお、スリックを直接観察した研究は、Bull (1986) や Willis and Oliver (1990) などのグレートバリアリーフにおける報告のみであり、他の海域での知見はない。

2. 観測の概要

対象海域は、多くの造礁サンゴ類が死滅した沖縄本島海域への幼生の供給源として考えられている慶良間列島とし(木村ら, 1992; 灘岡ら, 2001a)、調査は、造礁サンゴの産卵期である2001年6月上旬に行った。サンゴの産卵は、スノーケリングにより直接観察、または、現地での聞き込みによって記録した。

2.1 航空機によるスリック観察と船による幼生採集

スリックの形成時期と場所を空間的に把握するため、産卵のみられた翌朝からセスナ式小型航空機によって慶良間列島周辺に存在したスリックを観察した。観測日は、6月6日、8日、9日とした(7日は悪天候のため中止)。スリックの発見後、場所をGPSによって記録し、写真撮影を行った。撮影高度は380m〜480mとした。

また、観察されたスリック周辺で、船上より卵や幼生を採集し、その数を明らかにした。スリックは表層に高

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究
科情報環境学専攻
** 博(理) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究
科情報環境学専攻
*** 亜熱帯総合研究所 理工学研究科土木工
学専攻 博士課程
**** 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情
報環境学専攻 修士課程
***** 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情
報環境学専攻 博士課程
***** 阿嘉島臨海研究所
***** 亜熱帯総合研究所

密度に存在するため、500 ml のポリ瓶に直接採集し、5% 中性ホルマリンによって固定し、実験室内に持ち帰り、数を計測した。

2.2 沿岸水温モニタリング

水温の季節変動を明らかにするため、広域水温モニタリングネットワーク (ORTMN, 灘岡ら, 2001b; Nadaoka ら, 2001) のデータを使用した。ORTMN は、琉球列島の水温を 100 地点程にわたりメモリー式小型水温計 (TidbiT, Optic Computer 社) を設置し、水温をモニタリングするネットワークである。このうち、2001 年 1 月 1 日～10 月 31 日の慶良間列島沿岸水深 1.5 m～4.5 m の 5 地点 (o1～o5, 表-1 および図-6) と、比較のため、石垣島白保海域における同期間のデータを使用した。また、産卵期間中の水温変動を空間的に詳細に把握するため、2001 年 6 月 5 日～7 月 11 日に、慶良間列島沿岸の 13 か所、水深 7 m～12 m に同様なメモリー式小型水温計を

設置した (図-6, k1～k4, k7～k15)。また、水深約 50 m の 3 地点 (D1～D3) と、約 30 m の 1 地点 (C) には、ブイ係留によって水深 10 m に水温計を設置した。なお、測定間隔は、すべて 10 分毎とした。

3. 解析結果と考察

3.1 サンゴの産卵とスリック動態

サンゴの一斉産卵は、2001 年 6 月 5 日～8 日の夜間、ミドリイシ属サンゴを中心にみられた (図-1)。満月は 6 月 6 日であり、産卵は満月の 1 日前～2 日後の 4 日間にわたり行われた。産卵場所を比較したところ、慶良間列島の南西側が早く産卵し、北東側が 1 日～3 日、遅いことがわかる。

スリック (図-2, 3) は、前日の夜に産卵のおこった海域周辺にみられる傾向があった (図-4)。一部のスリックは、産卵翌日には海岸に打ち上げられていた。スリック

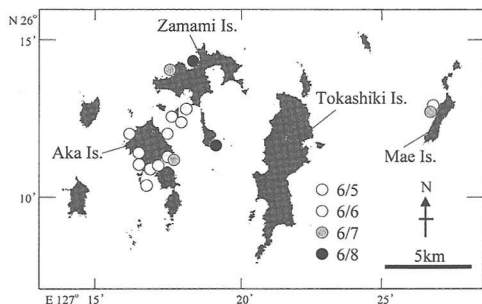


図-1 慶良間列島における造礁サンゴの産卵日



図-2 航空機から観察したサンゴのスリック (前島周辺)

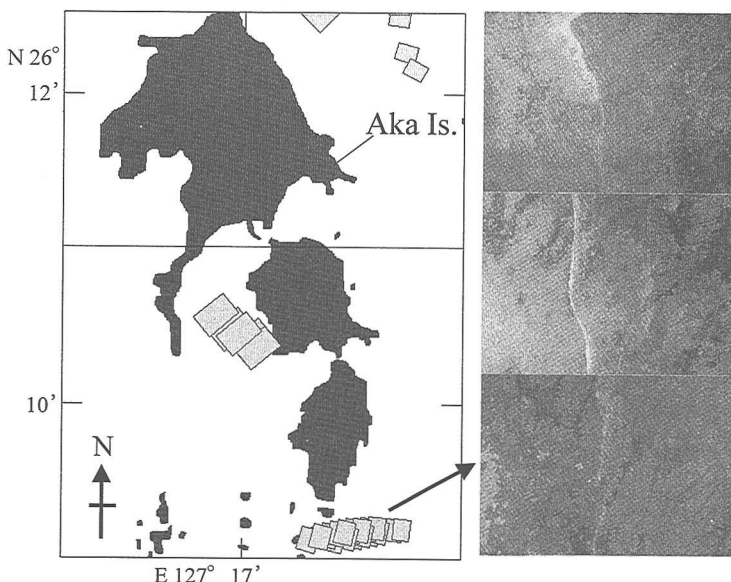
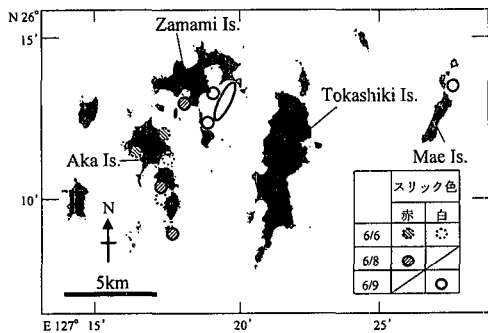
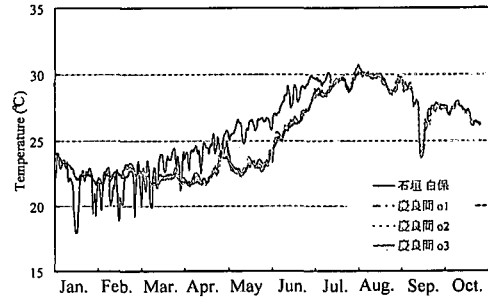


図-3 航空機の撮映範囲 (左) と観察したサンゴのスリック (右)



図一4 観察されたスリックの場所と色



図一5 慶良間列島および石垣島白保海域における水温変動 (2001年)

クは、全体に赤色または白色のものが観察され、その中には、幼生が $3.4\times10^6\sim4.2\times10^7$ 個体 $\cdot\text{m}^{-3}$ と高密度に分布した。

特に、赤色のスリック内には球形の正常なサンゴの卵が観察され、受精が順調に起こったものと考えられる。また、Oliver and Willis (1987) は、グレートバリアリーフで白いスリックを観察しており、スリック内の99.9%が死亡していたが、正常な卵や幼生が分布していたと報告しており（表層で230 個体 $\cdot\text{m}^{-3}$ ）、実際に幼生が分散していることを裏付けている。

スリックは発見後、数時間で消滅することがあったが、その後も周辺に高密度に幼生が分布し、スリックが再形成されるケースが確認された。今回の観察から、スリックは、産卵後の海況によって、形成－消滅－再形成を繰り返しながら、大局的に移流・拡散される可能性が考えられた。

3.2 サンゴの産卵日と水温の関係

a) 産卵時期と年水温変動

図一5 に、2001 年1月～10月までの水温変動を示す。慶良間列島では、水温は約21℃～31℃で変動し、3月上旬に最も水温が下降し、7月下旬～8月上旬にかけてピークとなった。サンゴの産卵は、水温が25℃以上となる上昇期にみられた。

琉球列島では、一斉産卵を行うミドリイシ属サンゴの産卵時期は高緯度になるにつれ遅くなり、最も早くて西表島や石垣島の4月、5月、慶良間列島を含む沖繩本島周辺では、5月または6月に産卵がみられる (Heyward ら, 1987; Hayashibara ら, 1993; 林原, 2002; 本研究)。実際に、石垣島白保海域の2001年の水温を比較すると、同一水温レベルに達するのが石垣島白保海域の方が、約1ヶ月早かった (図一4)。2001年のミドリイシの産卵は、石垣島富野海域では5月8日、6月4～6日に確認されている (林原, 私信)。

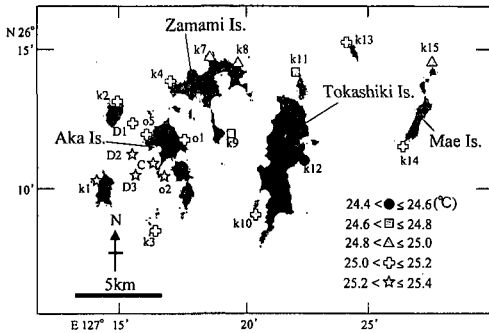
サンゴの産卵は、グレートバリアリーフ (Babcock, 1984) やカリブ海 (Szmant, 1986) などでも水温が25℃～26℃を超えた時期に起こっている。水温の上昇がサンゴの卵や精子の成熟を促し、産卵時期を決定しているものと考えられる。

b) 産卵期間を決定する要因

前述の通り、慶良間列島におけるミドリイシ属サンゴの一斉産卵は、5月または6月の満月前後数日間にみられる (Hayashibara ら, 1993; 本研究)。この原因として月齢周期の他、水温 (有効積算水温) があげられている (林原, 1995)。そこで、有効積算水温を検討した。以下に、林原 (1995) の検討結果を示す。阿嘉島におけるミドリイシ属サンゴの成熟が急激に進む3月上旬の阿嘉港

表一1 慶良間列島阿嘉島周辺海域における有効積算水温 (2001年)
A, 10:00の水温; B, 1日平均水温

			5月				6月		
地点名	水深 (m)		3 日前	満月	7 日後		3 日前	満月	7 日後
A	慶良間 o1	1.5	37.1	39.8	44.6	77.6	86.6	115.5	
	慶良間 o2	4.5	22.7	24.6	26.9	52.8	63.7	90.3	
	慶良間 o3	2.9	27.3	29.1	33.5	60.9	70.7	97.2	
	慶良間 o4	2.8	34.5	37.1	41.6	74.9	85.8	110.3	
B	慶良間 o1	1.5	37.1	39.7	44.0	75.0	84.1	109.3	
	慶良間 o2	4.5	22.0	23.6	27.5	53.7	64.4	89.7	
	慶良間 o3	2.9	27.3	29.1	33.6	61.1	70.9	97.6	
	慶良間 o4	2.8	33.2	35.5	40.4	70.6	81.1	108.5	



図一6 慶良間列島のサンゴ産卵期間における平均水温(2001年6月6～8日)

10:00の平均水温22°Cを成熟開始水温とし、3月1日以降産卵日までの22°C以上の水温を積算して有効積算水温とする。有効積算水温は58.9～128.4の範囲であり、100を超えるような場合は、産卵は満月当日またはその数日前に起こる(林原, 1995)。

今回、阿嘉島周辺の4地点における10:00の水温、および比較のため日平均水温を使用し有効積算水温を算出した(表一1)。各地点の10:00の水温では、5月の満月(5月7日)では24.6～39.8°Cと低く、6月の満月(6月6日)では63.7～86.6°Cであり、日平均水温では順に23.6～39.7°C、および64.4～84.1°Cであった。産卵は6月5日～8日にみられ、そのうち、5日は小規模であった。このことから、5月には水温が低く、卵が十分に成熟しなかったため6月に産卵が起こり、また、産卵前数日の水温も低く、満月よりも後に産卵したものと考えられる。

このように、産卵がどちらの月におこるかは、有効積算水温と月齢周期との関係で決定されるようである(林原, 1995)。水温と月齢が産卵の月を決定することは、メキシコ湾北西部でも報告されている(Hagmanら, 1998)。しかし、今回の調査では、近隣のサンゴ礁間でも産卵日が異なることが観察されていることから、ここでは地域的な水温の違いに着目して、次に検討する。

c) 産卵日と沿岸水温変動

図一5に、慶良間列島内の産卵期間中(6月6日～8日)の平均水温を示す。平均水温は、24.4°C～25.5°Cであり、慶良間列島内で約1°Cの差が観測され、南西部(k1, D1～3)から北東(k8, k11)へ向かうにつれて、平均水温は低下する形になっている。3.1節で述べたように、産卵日は南部から北部にかけて遅れており、水温の傾向と類似している(図一1)。このことから、産卵日を決定する要因の1つとして、水温が重要な役割をしており、その結果、近隣のサンゴ礁間でも産卵日が異なることが示唆される。

これまでに、地域内の産卵日の違いに関しては、水温の他、光量の差や産卵を促すケミカルシグナルの存在(Babcock, 1984; Harrison and Wallace, 1990; Shimoi-keら, 1992; Hayashibaraら, 1993)が示唆されていた。本研究では、さらに、空間的な水温の差を把握することによって、産卵直前の水温が、産卵への影響を及ぼすことを示した。

4. おわりに

本研究では、造礁サンゴ類の産卵とその後、形成されるスリックの動態について観察を行い、スリックは、短期間で形成-消滅-再形成を繰り返して分散していることを明らかにした。また、水温の時系列および空間分布を調べ、水温環境が月程度の時間スケールで産卵を支配するだけでなく、日スケールでの産卵日の決定要因の1つとしても重要であることを示した。

サンゴの産卵のタイミングは、受精率や、受精後の幼生の分散過程に影響を及ぼす。現在、サンゴ礁の破壊が危惧されており、ダメージを受けた礁への外部からのサンゴ幼生の供給の重要性が指摘されている。今後、幼生の供給源からの輸送経路解明のためにも、産卵日の特定が必要であると考えられ、沿岸水温変動を広域的にモニタリングすることが重要となる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究B(1)(研究代表者：灘岡, 課題番号：12450198)、同基盤研究B(2)(研究代表者：灘岡, 課題番号：12555147)、亜熱帯総合研究所・内閣府調査研究事業サンゴ礁に関する調査研究による受託研究を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 木村 匡・林原 毅・下池和幸 (1992): 漂流はがき実験結果報告, みどりいし, No. 3, pp. 18-21.
- 灘岡和夫・二瓶泰雄・花田 岳・藤井智史・佐藤健治・池間健晴・鹿熊信一郎・岩尾研二・若木研水 (2001a): HFレーダ・漂流ブイ観測と数値シミュレーションによるサンゴ幼生の広域輸送過程, 第48回海論文集, pp. 431-435.
- 灘岡和夫・若木研水・鹿熊信一郎・二瓶泰雄・諸見里聡・大見謝辰男・岩尾研二・下池和幸・谷口洋基・中野義勝・池間健晴 (2001b): 広域水温モニタリングネットワーク展開による沖縄サンゴ礁水温環境地域差の解析, 第48回海論文集, pp. 1276-1280.
- 林原 毅 (1995): 慶良間列島阿嘉島周辺の造礁サンゴ類とその有性生殖に関する生態学的研究, 東京水産大学博士論文, 123 p.
- 林原 毅 (2002): 造礁サンゴ類の有性生殖, 日本におけるサンゴ礁研究 I, 中森 亨編, 日本サンゴ礁学会, 108 p.
- Arai, T., M. Kato, A. Heyward, Y. Ikeda, Y. Iizuka, and T. Murayama (1993): Lipid composition of positively buoyant eggs of reef building corals, Coral Reefs, Vol. 12, pp. 71-75.

- Babcock, R. C. (1984): Reproduction and distribution of two species of *Goniastrea* (Scleractinia) from Great Barrier Reef, Coral Reefs, Vol. 2, pp. 187-195.
- Babcock, R. C. and A. J. Heyward (1986): Larval development of certain gamete-spawning scleractinian corals, Coral Reefs, Vol. 5, pp. 111-116.
- Bull, G. (1986): Distribution and abundance of coral plankton, Coral Reefs, Vol. 4, pp. 197-200.
- Harrison, P. L., R. C. Babcock, G. D. Bull, J. K. Oliver, C. C. Wallace and B. L. Willis (1984): Mass spawning in tropical reef corals, Science, Vol. 223, pp. 1186-1189.
- Harrison, P. L. and C. C. Wallace (1990): Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals, In: Dubinsky Z (Ed) Ecosystems of the world 25, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 133-207.
- 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., Vol. 101, pp. 253-262.
- Heyward, A., K. Yamazato, T. Yeemin, and M. Minei (1987): Sexual reproduction of corals in Okinawa, Galaxea, Vol. 6, pp. 331-343.
- Hagman, D. K., S. R. Gittings and K. J. P. Deslarzes (1998): Timing, species participation, and environmental factors influencing annual mass spawning at the Flower Garden Banks (Northwest Gulf of Mexico), Gulf of Mexico Sci., Vol. 2, pp. 170-179.
- Nadaoka, K., Y. Nihei, K. Wakaki, R. Kuman, S. Kakuma, S. Moromizato, T. Omija, K. Iwao, K. Shimoike, H. Taniguchi, Y. Nakano and T. Ikema (2001): Resional variation of water temperature around Okinawa coasts and its relationship to offshore thermal environments and coral bleaching, Coral Reefs, Vol. 20, pp. 373-384.
- Oliver, J. K. and B. L. Willis (1987): Coral-spawn slick in the Great Barrier Reef: preliminary observation, Mar. Biol., Vol. 94, pp. 521-529.
- Shlesinger, Y. and Y. Loya (1985): Coral community reproductive patterns: Red Sea versus the Great Barrier Reef, Science, Vol. 228, pp. 1333-1335.
- Shimoike, K., T. Hayashibara., T. Kimura and M. Omori (1992): Observations of split spawning in *Acropora* spp. at Akajima Island, Okinawa, Proc. 7th Int. Coral Reef Symp., Vol. 1, pp. 484-488.
- Szmant A. M. (1986): Reproductive ecology of Caribbean reef corals, Coral Reefs, Vol. 5, pp. 43-53.
- Willis, B. L. and J. K. Oliver (1990): Direct tracking of coral larvae: implications for dispersal studies of planktonic larvae in topographically complex environment, Ophelia, Vol. 32, pp. 145-162.
-