恩納村地先に植え付けられたミドリイシ属5種の成長

岡地 賢^{1,*}・伊藤馨司²・長田智史³・比嘉義視⁴・津波昭史⁵

¹ 有限会社コーラルクエスト 〒243-0014 神奈川県厚木市旭町 1-34-10

² 株式会社沖縄環境分析センター 〒901-2215 沖縄県宜野湾市真栄原 3-7-24

³ 一般財団法人沖縄県環境科学センター 〒901-2111 沖縄県浦添市経塚 720

⁴ 恩納村漁業協同組合 〒904-0414 沖縄県国頭郡恩納村字前兼久 59

⁵ 沖縄県環境部自然保護課 〒900-8570 沖縄県那覇市泉崎 1-2-2

要旨 沖縄県のサンゴ礁保全再生事業において、恩納村漁業協同組合が養殖した群体から採取し、陸上施設で基盤に付着させた約 10 cm のミドリイシ属 5 種 (*Acropora tenuis*, *A. hyacinthus*, *A. digitifera*, *A. donei*, *A. valenciennesi*) を、2013 年 11 月から 2014 年 3 月にかけて恩納村前兼久地先に植え付けた。これらのうち、個々に識別した群体を 2014 年 5 月から 2016 年 5 月まで約半年間隔で撮影し、写真上で群体の長径と短径を測定して幾何直径と近似面積を算出するとともに、輪郭をトレースして投影面積も求めた。近似面積と投影面積との間には高い相関がみとめられたが、近似面積の方が大きく、その割合は *A. tenuis* が $8.1 \pm 1.1\%$, *A. hyacinthus* が $5.4 \pm 0.9\%$, *A. digitifera* が $9.2 \pm 1.0\%$, *A. donei* が $18.5 \pm 2.1\%$, *A. valenciennesi* が $16.9 \pm 1.9\%$ であった (値は平均±標準誤差)。5 種につき個々の群体の約半年毎の 2 年間の成長量から、ゴンペルツ成長式によって成長率を推定した。これによると、*A. hyacinthus* と *A. valenciennesi* は植え付け後 2 年目以降も大きくなる一方、*A. tenuis*, *A. digitifera*, *A. donei* は 2 年目から 3 年目にかけて成長がゆるやかになる傾向が見出された。植え付け後の成長を直径や面積で見積もれるようになったことで、移植の計画段階において植え付け密度や被度、そして、食害防止や食害を受けた場合の追加植え付けなど積極的な管理が必要な期間に関する目標設定が可能となるであろう。

キーワード 恩納村, サンゴ移植, 投影面積と近似面積, 成長率

緒言

沖縄県が 2011 年から 2017 年にかけて実施したサンゴ礁保全再生事業では、様々な脅威により衰退が危惧されるサンゴ群集を、移植によって修復できる可能性の追求を目的として、過去に例をみない規模 (3 ヘクタール) でサンゴ種苗の植え付けが行われた (比嘉ら 2018)。その中心となった恩納村海域には、2013 年以降、合計 10 万本以上のサンゴ種苗が植え付けられ、より効率的・効果的な移植技術確立にむけて多面的にデータが取得されている。

この事業が単なる移植試験と異なっていたのは、現場で植え付けを担った恩納村漁業協同組合が「生物多様性に配慮したサンゴ群集の再生」を掲げ、再

生群集が繁殖集団となって広い範囲のサンゴ群集回復に貢献することを目指した点である。そのために種苗親株の遺伝子型分析を行い、できるだけクローンの種苗が隣り合わない配置で植え付けが計画された。当初は種苗に対する食害を軽減するため植え込み密度を 20 本/m² (約 22 cm 間隔) としたが、隣接群体間の競争による成長阻害がみられ、産卵にも影響することが予想されたため、2014 年以降は 2.8 本/m² (約 60 cm 間隔) に変更した。これが結果的に適切であったことは、並行して行われた成長率測定によって裏付けられた (沖縄県 2017)。このような順応的な植え付けが可能となったのは、恩納村漁協が独自に行っていたサンゴ植え付け活動で蓄積した経験を有していたからに他ならないが、民間団体がサンゴ移植を行う場合は既報の知見や事例を参考として植え付け計画を立てることが一般的である (Precht 2006)。特に、種苗の成長率は、どのような再生群集を作り出すかという計画段階において重

*連絡著者

E-mail: cab67820@pop06.odn.ne.jp

要なパラメータとなる (Edwards 2010)。そこで本研究では、将来の移植活動に資することを目的に、沖縄県サンゴ礁保全再生事業で継続的に撮影された種苗の写真を利用して、恩納村海域に植え付けられたミドリイシ属 5 種の直径と投影面積の成長率を求め、報告することとした。

材料と方法

本研究で測定対象としたミドリイシ属 5 種 (*Acropora tenuis*, *A. hyacinthus*, *A. digitifera*, *A. donei*, *A. valenciennesi*) の植え付け種苗は、恩納村漁業協同組合が平成 10 年から特定区画漁業権海域においてひび建て式で養殖していた群体から採取された。種苗はマグホホワイト製円柱スティック基盤 (直径 2.8 cm × 高さ 8 cm, 底部に長さ 4 cm のボルト付き, 沖縄セメント株式会社製) にステンレス針金で固定し、半年以上、陸上水槽内で種苗を基盤へ固定した後、恩納村内の礁池に設置された単管パイプ製棚上で育成し基盤に付着させた (Higa and Omori 2014; 沖縄県 2014; 比嘉ら 2018)。これらの種苗は、沖縄県が恩納村漁業協同組合に委託した「恩納村海域サンゴ礁再生実証事業」において、同村前兼久地先 (26° 26′ 50″ N, 127° 47′ 40″ E) の礁池沖側に点在する石灰岩上 (水深約 2.0–3.0 m) に、2013 年 11 月初旬から 2014 年 3 月中旬にかけて植え付けた。なお、植え付け時の種苗の大きさは、スティック基盤よりやや長い、約 10 cm とみなして正確な測定は行わなかった (沖縄県 2014)。植え付け開始から約 6 ヶ月目にあたる 2014 年 5 月に初回、以後、約 6 ヶ月間隔で 2016 年 5 月までの 5 回、個々に識別した群体をサイズ既知の方形枠またはスケールとともに直上から写真撮影した。撮影された群体のうち、本研究の成長率推定の対象として、波浪などによる物理的損傷がみとめられないか、または少ないものを選定した (沖縄県 2017)。各種の群体数は、*A. tenuis* が 44 群体、*A. hyacinthus* が 51 群体、*A. digitifera* が 60 群体、*A. donei* が 41 群体、*A. valenciennesi* が 43 群体であった。写真に写し込まれた群体の長径、短径および投影面積を、室内のパソコンでイメージ J (米国国立衛生研究所ウェブサイト <https://imagej.nih.gov/ij/>) を使用して算出した。また、写真から取得した長径、短径の値から、恩納

村の再生事業で植え付け後のモニタリングに際し群体成長の指標としている幾何直径 ($\sqrt{ab}$) および近似面積 ($\pi ab/4$) をそれぞれ算出した (ただし、 a は長径、 b は短径)。

測定した投影面積と近似面積の間の相関係数および回帰式は統計ソフト R の lm 関数を使用して求めた。一方、植え付け後の月数と幾何直径および投影面積の関係については、種苗ごとの植え付け日や植え付け時のサイズが明確ではないことから、写真撮影時点のサイズデータをまとめてサブサンプルとして平均値を求め回帰式を得る解析方法ではなく、個々の群体について一定時間に対するサイズデータ増分の回帰式からゴンベルツ成長式を導く Yamaguchi (1983) の方法を採用した。

植え付けたサンゴ群体の成長がゴンベルツモデルにあてはめられる場合、写真撮影時の測定値 (ここでは幾何直径または投影面積) を S_t 、次回撮影時の測定値を S_{t+1} としたとき、 S_t と S_{t+1} の間に下記の有意な一次回帰式が成り立つ。

$$\ln(S_{t+1}/S_t) = a \cdot \ln S_t + b \quad \dots (1)$$

または

$$\ln S_{t+1} = (1+a) \cdot \ln S_t + b$$

一方、ゴンベルツ成長式は下記のようにあらわされる：

$$\ln S_t = \ln S_\infty \cdot (1 - be^{-Kt}) \quad \dots (2)$$

式 (2) において、 S_∞ は移植群体が成長できる理論上の最大投影面積 (極限値)、 e はネイピア数、 K は成長係数、 b は初期値 S_0 を規定することで求められる定数である。式 (2) の $\ln S_\infty$ は (1) 式の X 切片に、 $-(1 - e^{-K})$ は (1) 式の傾きにそれぞれ等しいことから、成長係数 K を求めた。また、初回撮影時の平均測定値と $t=0$ を式 (2) に代入することにより定数 b を求めた。

結果と考察

恩納村で植え付けられたサンゴ群体の投影面積と近似面積の相関係数は 5 種すべてについて有意で ($p < 0.001$)、次に示す一次式が得られた (図 1)。

$$A. \textit{tenuis} \quad Y = 0.8985X + 26.9221 \quad (r^2 = 0.9868)$$

$$A. \textit{hyacinthus} \quad Y = 0.9542X + 16.0847 \quad (r^2 = 0.9972)$$

$$A. \textit{digitifera} \quad Y = 0.8401X + 45.7390 \quad (r^2 = 0.9477)$$

$$A. \textit{donei} \quad Y = 0.9114X - 16.4397 \quad (r^2 = 0.9942)$$

図 1 恩納村で植え付けられた5種のミドリイシ属サンゴから抽出された群体の長径と短径から算出した近似面積と、写真計測によって求めた投影面積の散布図および回帰式

Fig. 1 The relationships between geometrically estimated area (X axis) and photographically measured projected area (Y axis) for transplanted five species of *Acropora* (*A. tenuis*, *A. hyacinthus*, *A. digitifera*, *A. donei*, *A. valenciennesi*)

図2 恩納村で植え付けられた5種のみドリシ属サンゴから抽出された群体の写真計測値に基づいて推定した幾何直径 (D) と投影面積 (S) のゴンペルツ成長式

Fig. 2 The Gompertz growth curves for geometric diameter (D) and projected area (S) in transplanted five species of *Acropora* (*A. tenuis*, *A. hyacinthus*, *A. digitifera*, *A. donei*, *A. valenciennesi*)

A. valenciennesi

$$Y = 0.9345X - 28.2557 \quad (r^2 = 0.9966)$$

ただし、これらの一次式において、Y は投影面積、X は近似面積である。

恩納村で植え付けたサンゴ群体のモニタリングで使用されていた近似面積は、実際の投影面積と比較して大きく、その割合は *A. tenuis* が $8.1 \pm 1.1\%$ 、*A. hyacinthus* が $5.4 \pm 0.9\%$ 、*A. digitifera* が $9.2 \pm 1.0\%$ 、*A. donei* が $18.5 \pm 2.1\%$ 、*A. valenciennesi* が $16.9 \pm 1.9\%$ であった (値は平均 $\pm$ 標準誤差)。しかし、群体の直径に逆算したときの差異は数センチメートルの範囲で、例えば、幾何直径 30 cm と 60 cm の *A.*

donei 群体では、一次式で補正した投影面積値から逆算した直径はそれぞれ約 28.3 cm と約 57.1 cm となり、野外で測定する場合は誤差と呼んで差し支えない範囲である。野外調査と画像解析により植え付けたサンゴ群体の投影面積を測定するよりも、長径と短径を測定して近似面積を求めたほうが労力や時間といった植え付け現場のリソースを節約できるので、モニタリングという目的において近似面積は今後も成長被度の指標として有用だと考えられる。

恩納村前兼久地先に植え付けられた5種のサンゴ群体の測定値から推定した、植え付け後月数と幾何直径および投影面積のゴンペルツ成長式は次のとおりである。これらの式に基づいて描いた成長曲線を図2に示した。

$$\begin{aligned} A. tenuis \quad & \ln(Dt) = 4.1757(1 - 0.5384e^{-0.0309t}) \\ & \ln(St) = 8.5007(1 - 0.5696e^{-0.0274t}) \\ A. hyacinthus \quad & \ln(Dt) = 5.7052(1 - 0.6607e^{-0.0220t}) \\ & \ln(St) = 11.2008(1 - 0.6771e^{-0.0217t}) \\ A. digitifera \quad & \ln(Dt) = 3.8760(1 - 0.5825e^{-0.0287t}) \\ & \ln(St) = 7.6201(1 - 0.6036e^{-0.0274t}) \\ A. donei \quad & \ln(Dt) = 4.2464(1 - 0.4738e^{-0.0405t}) \\ & \ln(St) = 8.3363(1 - 0.5012e^{-0.0381t}) \\ A. valenciennesi \quad & \ln(Dt) = 5.2752(1 - 0.5366e^{-0.0238t}) \\ & \ln(St) = 10.4489(1 - 0.5639e^{-0.0229t}) \end{aligned}$$

ただし、これらのゴンペルツ成長式において、D は幾何直径、S は投影面積、t は植え付け後月数である。

恩納村では、植え付けた種苗が2年半後には成熟し始め、一部は産卵することがわかっている。恩納村前兼久地先に、同村漁業協同組合が2012年3月に植え付けた *A. tenuis* の30群体について、2015年6月4日に目視により群体枝断面を観察したところ、長径 15 cm 未満の6群体にはバンドルが確認されなかったが、長径 15-20 cm の8群体のうち2群体に、長径 20-25 cm の10群体のうち7群体に、長径 25 cm 以上の6群体すべてに成熟したバンドルの保有を確認した。本研究の対象であった2013年植え付けの群体では、長径 15 cm 未満の20群体にはバンドルがみられなかったが、長径 15-20 cm の3群体でバンドルが確認できた。この調査の22日後には、2012年植え付けでバンドルの保有が確認された5群体と、2013年に植え付けられた群体の一部が、他の植え付け群体とともに一斉産卵した

(Zayasu and Shinzato 2016)。 *A. tenuis* が植え付け後約 2 年半、直径 20–25 cm で成熟することは阿嘉島でも確認された (Iwao et al. 2010)。図 2 の成長曲線では、 *A. tenuis*, *A. digitifera*, *A. donei* の成長が植え付け後 36 ヶ月頃からゆるやかになるが、 *A. hyacinthus* と *A. valenciennesi* は植え付け後の時間経過とともに成長が速くなる傾向がみられる。多様性を高め、産卵群集を形成するねらいでこれらの種を混ぜて植え付ける場合は、成熟サイズに達する 3 年目以降も群体どうしが接触しないよう、植え付け時の種苗間の距離に注意が必要である。

本研究で得たこれらの成長式は、恩納村海域の水深約 3 m の礁原に植え付けられた種苗の成長をおしなべた平均的なものであって、造礁サンゴがもつ特性として、個々の群体によって、また、植え付ける海域が異なる場合や、同じ恩納村海域であっても水深などの環境条件が異なる場合は成長率が変わることがある (Cummings et al. 2015)。しかし、植え付け後の成長を直径や面積で見積もれるようになったことで、移植の計画段階において植え付け密度や被度、そして、食害防止や食害を受けた場合の追加植え付けなど、積極的な管理が必要な期間に関する目標設定が可能となる。さらに、植え付ける海域における種苗の生残率を予備的に把握すれば、目標を達成するために必要なコストの見積もりもより現実的になるであろう。

謝辞

本研究は、平成 23 年から 29 年にかけて沖縄県が実施したサンゴ礁保全再生事業（恩納村海域サンゴ群集再生実証事業）で植え付けたサンゴの将来的なサンゴ群集の面積と被度について考察するために行った。実施に当たっては、土屋誠委員長をはじめとするサンゴ礁保全再生事業検討委員会の皆様に多くの助言とご指導を賜りましたこと、厚く感謝申し上げます。

引用文献

- Cummings K, Zuke A, De Stasio B, Krumholz J (2015) Coral growth assessment on an established artificial reef in Antigua. *Ecol Restor* 33: 90–95
- Edwards AJ (2010) Reef rehabilitation manual. Coral reef targeted research and capacity building for management program, St. Lucia, Australia, 166p
- Higa Y, Omori M (2014) Production of coral colonies for outplanting using a unique rearing method of donor colonies at Onna Village, Okinawa, Japan. *Galaxea J Coral Reef Stud* 16: 19–20
- 比嘉義視・新里宙也・座安佑奈・長田智史・中村良太・横倉 厚・謝名堂 聡・大森 信 (2018) 沖縄県サンゴ礁保全再生事業における無性生殖を利用したサンゴの種苗生産と植込み技術の段階的進歩. *日本サンゴ礁学会誌* 20: 21–37
- Iwao K, Omori M, Taniguchi H, Tamura M (2010) Transplanted *Acropora tenuis* (Dana) spawned first in their life 4 years after culture from eggs. *Galaxea J Coral Reef Stud* 12: 14
- 沖縄県 (2014) 平成 25 年度恩納村海域サンゴ群集再生実証事業報告書. 沖縄県環境生活部自然保護課, 沖縄, 62p
- 沖縄県 (2017) サンゴ礁保全再生事業—平成 28 年度恩納村海域サンゴ群集再生実証事業. 沖縄県環境部自然保護課, 沖縄, 731p
- Precht WF (2006) Coral reef restoration handbook. CRC Press, Boca Raton, USA, 24p
- Yamaguchi M (1983) Growth data analysis in the reef-building coral *Pocillopora damicornis* (Linnaeus). *Galaxea* 2: 21–27
- Zayasu Y, Shinzato C (2016) Hope for coral reef rehabilitation: massive synchronous spawning by outplanted corals in Okinawa, Japan. *Coral Reefs* 35: 1295, doi: 10.1007/s00338-016-1463-7

2020 年 3 月 24 日 受領

2020 年 5 月 18 日 受理

Growth of five species of *Acropora* transplanted on the reef of Onna Village, Okinawa, Japan

Ken OKAJI^{1,*}, Keiji ITO², Tomofumi NAGATA³,
Yoshimi HIGA⁴, and Akifumi TSUHA⁵

¹ Coralquest Inc., 1–34–10 Asahicho, Atsugi, Kanagawa 243–0014, Japan

² Okinawa Environmental Analysis Center Co., Ltd. 3–7–24 Maehara, Ginowan, Okinawa 901–2215, Japan

³ Okinawa Prefecture Environment Science Center, 720 Kyoazuka, Urasoe, Okinawa 901–2111, Japan

⁴ Onna Village Fisheries Cooperative, 59 Maeganeku, Onna, Okinawa 904–0414, Japan

⁵ Okinawa Prefectural Government, 1–2–2 Izumizaki, Naha, Okinawa 900–8570, Japan

* Corresponding author: K. Okaji

E-mail: cab67820@pop06.odn.ne.jp

Communicated by Takashi Nakamura (Ecology Editor)

Abstract The growth of five species of *Acropora*, *A. tenuis*, *A. hyacinthus*, *A. digitifera*, *A. donei*, *A. valenciennesi*, transplanted on the reef of Maeganeku, Okinawa, Japan, was monitored during a coral restoration program implemented by the Okinawa Prefectural Government. The major/minor axis length and projected area of identified coral transplants were measured using photographs taken every six months period between 2014 and 2016. The geometrically estimated area of each transplant species, which was calculated by major/minor axis length, was strongly correlated with the projected area, although the former was overestimated ($8.1 \pm 1.1\%$ for *A. tenuis*, $5.4 \pm 0.9\%$ for *A. hyacinthus*, $9.2 \pm 1.0\%$ for *A. digitifera*, $18.5 \pm 2.1\%$ for *A. donei*, and $16.9 \pm 1.9\%$ for *A. valenciennesi*, mean $\pm$ SE). It was found from the growth equations that the growth of *A. tenuis*, *A. digitifera* and *A. donei* seemed to reach a determinate phase in 2 to 3 years after transplantation, while *A. hyacinthus* and *A. valenciennesi* continued their growth. Information regarding the growth of transplanted corals obtained in this study enables various entities assisting the design of a coral transplantation project, including a period required for human intervention, as well as the transplant densities and projected coral cover.

Keywords: Onna Village, coral transplants, projected area and approximate area, growth

Received: 24 March 2020/Accepted: 18 May 2020

© Japanese Coral Reef Society