

VI. サンゴ礁の大規模な面的保全・回復技術の 概要資料の作成

目 次

VI. サンゴ礁の大規模な面的保全・回復技術の概要資料の作成

1. 日本語版 VI-1
 サンゴ礁の大規模な面的保全・回復技術の概要資料
2. 英語版 VI-8
 Overview of large-scale areal conservation restoration techniques for coral reefs

1. 開発した技術

(1) 開発の背景

水産庁は 2007 年度から有性生殖によるサンゴ増殖に取り組んでおり、2017 年度までに開発した技術は「有性生殖によるサンゴ増殖の手引き」(2019 年 3 月、水産庁) (以下、手引きという) として公表している。手引きは広く普及され、サンゴ増殖やサンゴ礁の回復を目指して活動する団体によって活用されている。

しかし、海水温の上昇に代表される環境変化によって、想像を超えてサンゴの衰退が進行しており、より効率的により広域にサンゴ礁を回復させる技術が求められている。そこで、水産庁では 2018 年度より有性生殖を活用して更に効率的かつ広範囲でサンゴ礁を回復させる一連の技術の開発に取り組んでいる。本資料では、2022 年度までの 5 年間で開発された以下の要素技術について、その概要を説明する。

- 幼生の移動・拡散を予測する技術
- サンゴ幼生着床・育成基盤
- サンゴ幼生を広域に供給する技術
- ICT を活用したサンゴ被度計測技術

(2) 各要素技術の関係性

手引きに記載されているサンゴ面的増殖技術は、有性生殖法により大量に種苗生産して、中間育成を経て人の手で天然基盤に移植し、サンゴ礁を回復させる技術である。それに対して、今回紹介する一連の技術はサンゴの着床・育成に適した基盤上にサンゴ幼生を一定以上の密度で着底させ再生産可能な親サンゴまで育成することを目指している。重要となる各要素技術の関係を図 1 に示す。

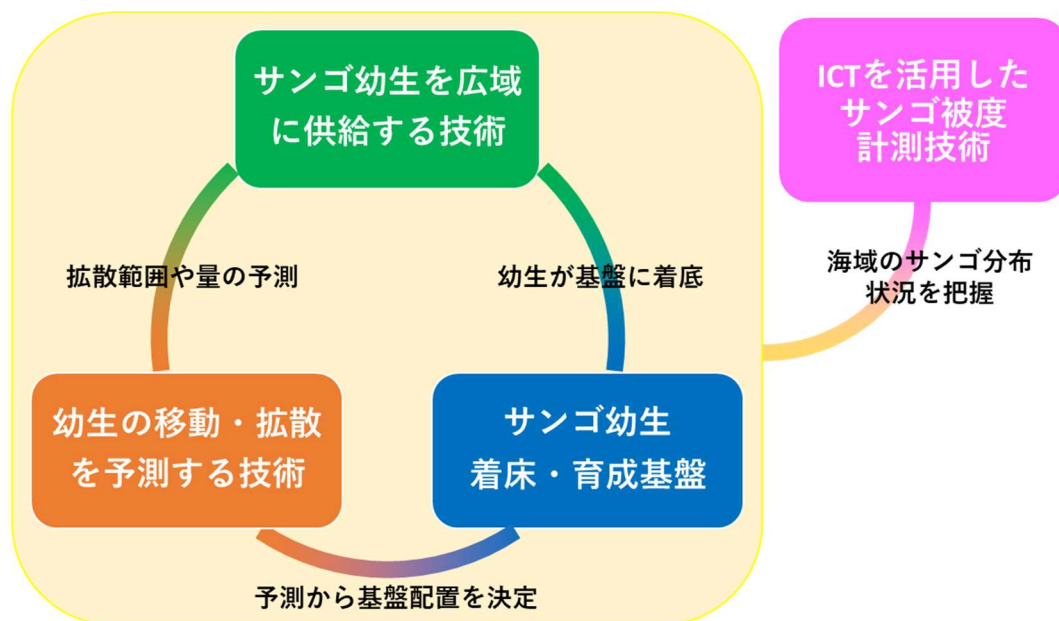


図 1 各要素技術の関係

2. 幼生の移動・拡散を予測する技術

(1) 技術内容

本技術は、数値シミュレーションモデルによってサンゴ幼生放流による効率的・効果的な放流場所及び着底場所、着底量を予測する技術である。

シミュレーションモデルは、サンゴ産卵～放流時期の海域の流れ場を予測する「流動モデル」と、流れによって幼生が浮遊移動、着底する挙動を予測する「浮遊幼生移動モデル」を組合せた、面的拡散シミュレーションモデルを構築した。

サンゴ幼生を広域に供給する方式は図2に示すように2タイプに大別される。一つは、幼生の収集から放流までを人為的に行う「幼生収集タイプ」である。もう一つは、幼生供給基盤上の親サンゴから自然に産卵・拡散されたサンゴ幼生が、予測によって配置された基盤上に着底することを目指す「直接放流タイプ」である。面的拡散シミュレーションモデルは、両タイプにおける放流計画の検討に用いる。

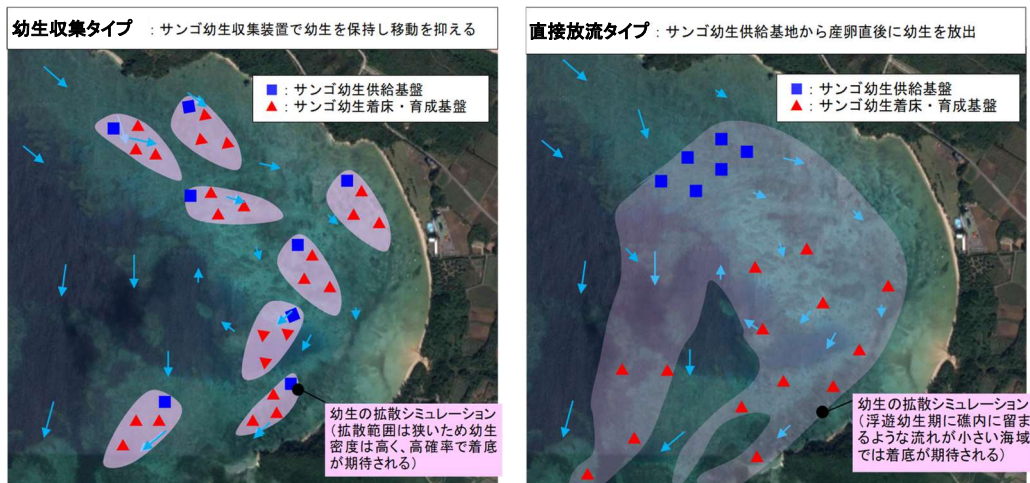


図2 サンゴ浮遊幼生の放流方式と拡散イメージ

(2) 効果

① 幼生収集タイプによる放流計画の立案と幼生着底範囲の予測

幼生収集タイプによる幼生供給範囲及び着底量は、放流する高さや放流移動速度、放流量によって変わる。すなわち、着底させたい範囲と着底量を設定して、効率的・効果的な放流計画を立案する必要がある。

数値シミュレーションモデルを用いた放流実証試験結果の再現計算により、約90%の精度で幼生拡散範囲を再現できた(図3(1)、(2))。これによって、効率的・効果的な幼生放流計画の立案が可能となった。

② 直接放流タイプによる放流の可能性検討及び幼生供給基盤配置計画への適用

流動モデルを用いて、対象海域の過去10年間の気象・海象状況のデータをもとにした平均的・代表的な流況を予測することに成功した。さらに面的拡散シミュレーションを利用することで、サンゴを回復させたいエリアに一定量の幼生を着底させるためには「どの位置から(幼生供給基盤の配置)」、「どれくらいの幼生を放出させる必要があるか(親サンゴの数=幼生供給基盤の規模)」を予測することが可能となった(図3(3))。

結果、効果的・効率的にサンゴを回復するために幼生供給手法として両手法からの選

定が可能となった。

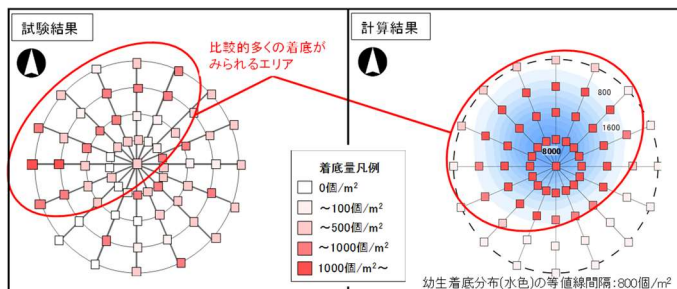


図 3(1) 幼生収集タイプ（固定式・断続移動式）放流の再現計算結果（再現率 89%）

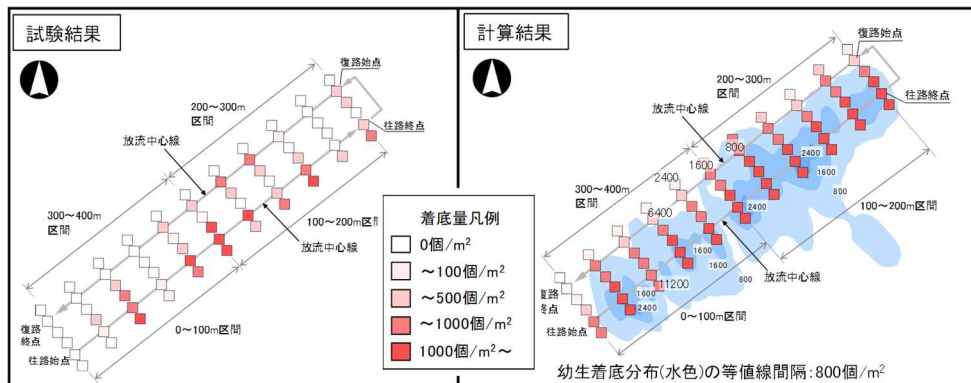


図 3(2) 幼生収集タイプ（連続移動式）放流の再現計算結果（再現率 92%）

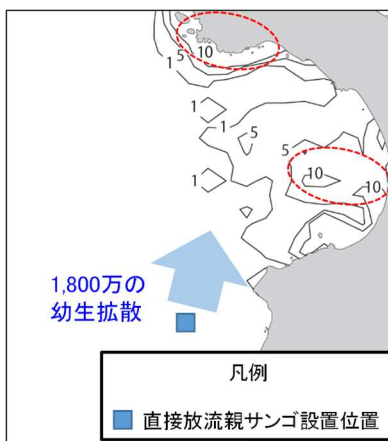


図 3(3) 直接放流タイプによる放流の幼生着底予測結果

3. サンゴ幼生着床・育成基盤

(1) 形状

安定性や耐久性を考慮され設計された鋼製の架台上に 8 枚の格子状着床基盤を設置する。中心には着床基盤を設置せず水抜き部とし、基盤に掛かる揚力の低減を図っている。

平型と凸凹型の 2 タイプの基盤を開発した。平型は凸凹型と比較してシンプルな形状で安価である利点がある。凸凹型は複雑な形状でやや高価であるが、着生したサンゴが成長した際に、サンゴ同士が接触し成長を妨げる可能性が低いという利点がある。

開発した基盤のサイズは、平型が 2, 160×2, 160×650mm（幅×奥行×高さ）、凸凹型は 2, 160×2, 160×800mm（幅×奥行×高さ）である。凸凹型が 150mm 高いが、下段までの高さは 650mm であり平型と同様である。



図4 標準2タイプの形状（左：平型、右：凸凹型）

(2) 基本的機能

本基盤は下に示した多くの機能を有しておりサンゴの着床・育成に適した環境を作り出す。

- ① 格子状構造により、通水性が確保され浮泥が溜まりにくい
- ② 格子状構造により、格子内部の稚サンゴは魚類等に捕食されにくい
- ③ 格子状構造により、格子内では強光が低減される
- ④ 架台の脚を丸鋼(Φ30mm)としているためオニヒトデの這い上がりが防がれる
- ⑤ 着床基盤まで高さ 650mm 以上としており、砂礫の移動による被害を低減できる



図5 格子内部で育成する稚サンゴ

なお、海域実証に使用した基盤上では着底3年後のモニタリングにおいても減耗はほとんど認められておらず、着底したサンゴの高い生残率が期待できる。

4. サンゴ幼生を広域に供給する技術

(1) 技術の概要

前述の「幼生の移動・拡散を予測する技術」によって面的に設置されたサンゴ幼生着床・育成基盤に大量のサンゴ幼生を人為的に供給する手法である。成長過程での減耗と受精可能な親サンゴ間の距離を考慮し、基盤への着底密度は 100 個/m² 目標としている。実施フローを図6に示す。

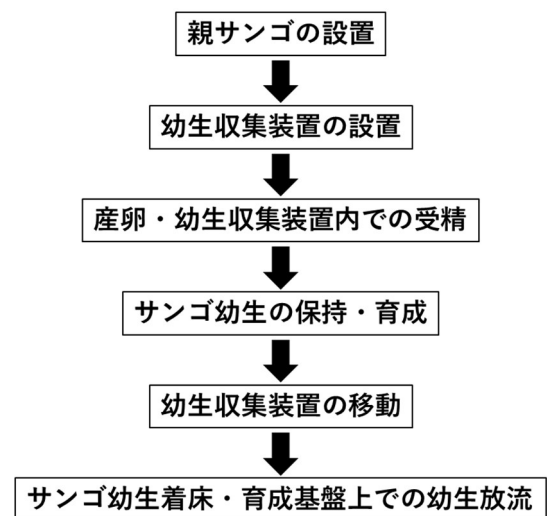


図6 サンゴ幼生を広域に供給するフロー

(2) 幼生収集装置の高度化

大量のサンゴ幼生を供給するため、より多くの親サンゴのバンドルを採取できるように改良した。

図 7 にあるように、親サンゴを設置した複数の架台の上に円錐状のシートを張り、ホースを通じて海面の幼生収集装置までバンドルが浮上する。海面まで浮上したバンドルは弾け、精子と卵が放出される

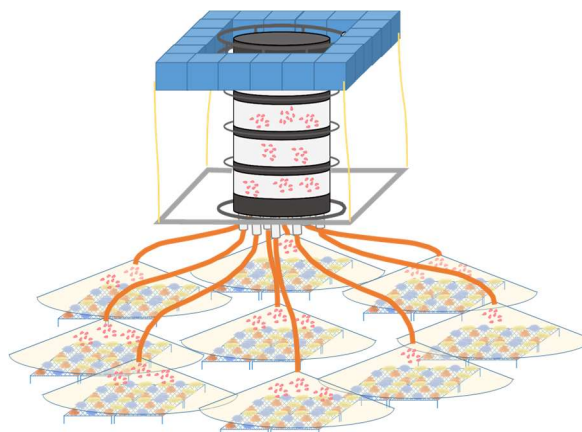


図 7 高度化された幼生収集装置

(3) 幼生放流手法

幼生放流手法は大きく固定式放流と移動式放流に分かれる。さらに移動式放流はその移動パターンによって断続移動式放流と連続移動式放流に分かれる。断続移動式放流は幼生収集装置内の幼生を複数回に分けて放流する手法であり、固定式放流と移動を繰り返す。連続移動式放流は移動しながらサンゴ幼生を放流する手法であり、移動速度や移動時の装置の姿勢を調整する必要があることから、断続移動式放流に比べ高い技術力が求められる。一般的に連続移動式放流、断続移動式放流、固定式放流の順番で難易度が高くなる。

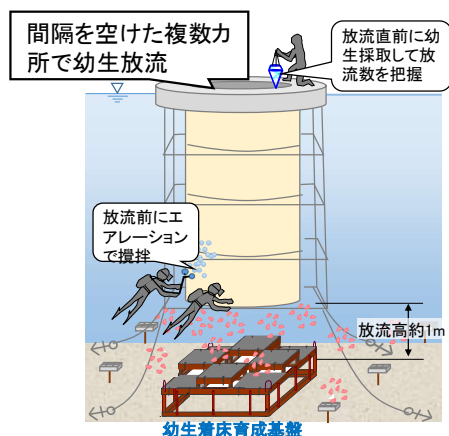


図 8 固定式放流（複数箇所で放流すれば断続移動式放流）

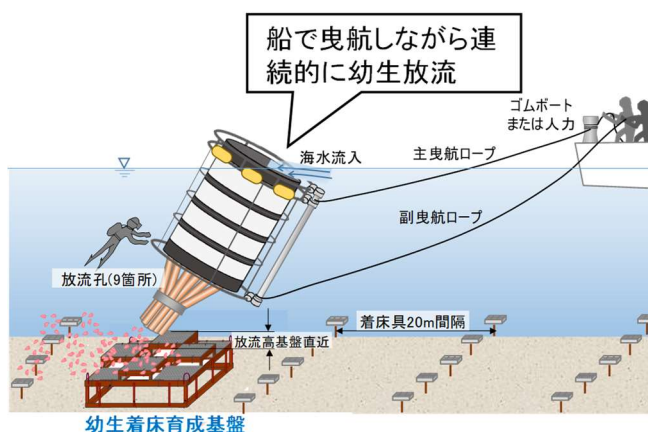


図 9 連続移動式放流

5. ICT を活用したサンゴ被度計測技術

(1) 技術の概要

サンゴ礁の保全や回復の活動を実施する際には、初期状況や活動成果を確認する現状把握として、サンゴ被度計測や分布するサンゴの分類が行われる。

従来からの手法としてダイバーの目視によるサンゴ被度計測やサンゴの分類が主流となっているが、活動の規模を拡大するには広範囲をより効率的に現状把握できる技術が必要となる。そのため、ダイバーによる目視に代わり、リモコンボートの船底に取り付けた水中カメラによるサンゴ計測技術と、AIによるサンゴ分類技術を開発した。



図 10 リモコンボートの外観

(2) 水中カメラによるサンゴ計測技術

リモコンボートの船底に取り付けた水中カメラを活用することで、広範囲のサンゴ礁の撮影が可能となった。沖縄沿岸海域における実証試験では画像取得の効率は約 3.3 日/10ha で、従来の潜水士による画像取得効率である約 18 日/10ha に比べて、撮影日数は約 1/4 に短縮できることが示された。

また、撮影動画から切り出した静止画をモザイク処理することで、海底面のサンゴの細かな枝の形状をはっきりと捉えることができる高精細な画像を作成できた。

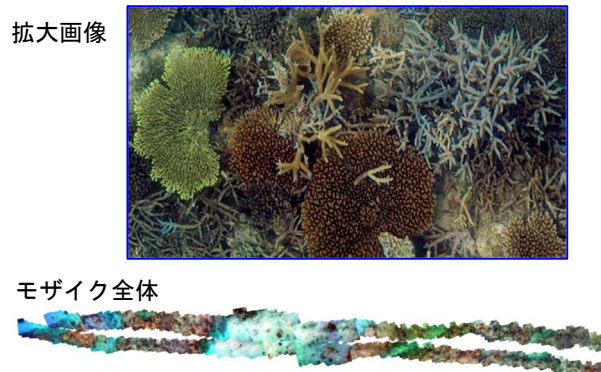


図 11 撮影結果とモザイク画像

(3) AIによるサンゴ分類技術

得られたモザイク画像から、サンゴの分布状況を把握する AI モデルの構築を検討した。そのためには質の高い教師データを学習させる必要があるため、サンゴの輪郭の特徴を捉えられるよう、GIS ソフトを用いて詳細に領域をポリゴン化して教師データを作成した。また、1枚に接合する前のモザイク画像は、撮影時の光条件や写り込んだ対象物によって色調の違いが生じる。しかし、前処理として画像の標準化を行うことで解析精度を向上できた。結果、サンゴ・非サンゴの 2 分類は分類精度 80%以上が得られ、種別分類でもコリンボース状サンゴでは 85%、樹脂状サンゴでは 79%の分類精度が得られた。

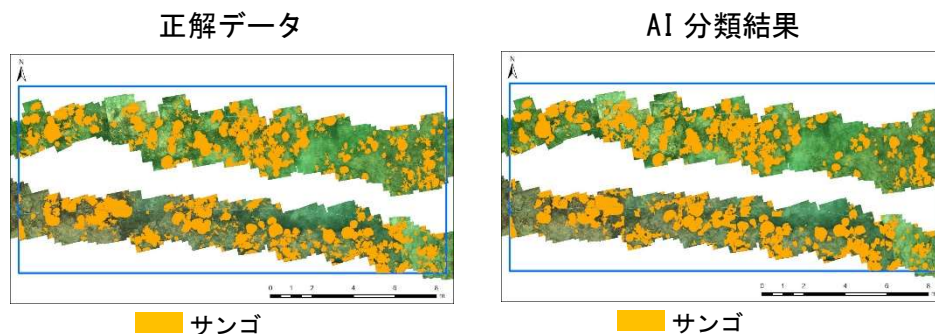


図 12 AI による分類結果 (2 分類)

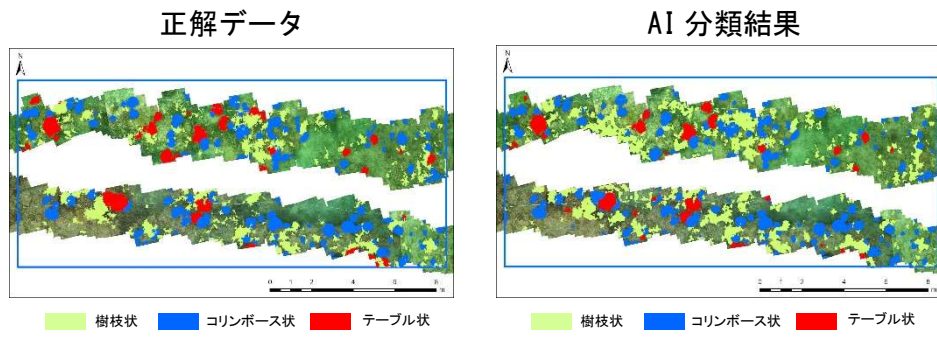


図 13 AI による分類結果（種別分類）

Overview of large-scale areal conservation restoration techniques for coral reefs

1. Technologies developed

(1) Background

The Fisheries Agency of Japan has been working on coral propagation using sexual reproduction since 2007 and has published the technology developed up until 2017 in the “Handbook of Coral Reef Restoration Technology by Sexual Reproduction” (March 2019, Fisheries Agency of Japan) (hereinafter referred to as the handbook). This handbook has been widely disseminated and subsequently used by organizations working on coral propagation and reef restoration.

However, environmental impacts from rising seawater temperatures have resulted in severe coral decline, therefore there is a need for technology that can restore coral reefs more efficiently and over a wider area. Since 2018, the Fisheries Agency of Japan has been developing a series of technologies aiming to restore coral reefs more efficiently and extensively through sexual reproduction. This document provides an overview of the following elemental technologies developed over the past five years up until 2022:

- Technology for forecasting the movement and spread of coral larvae
- Development of Artificial base for Coral larvae settlement and growth
- Technology to supply coral larvae over a wide area
- Coral coverage measurement technology utilizing ICT

(2) Relationships between each elemental technology

Coral propagation technology using the sexual reproduction method described in the handbook consists of three stages: Mass production of juvenile corals, farming of juveniles in nurseries, and outplanting of grown corals. The series of technologies introduced here aim to grow coral larvae into reproducible adult corals by settling them at certain densities on an artificial base suitable for coral settlement and growth. The relationships between each key element of the technology are shown in Figure 1.

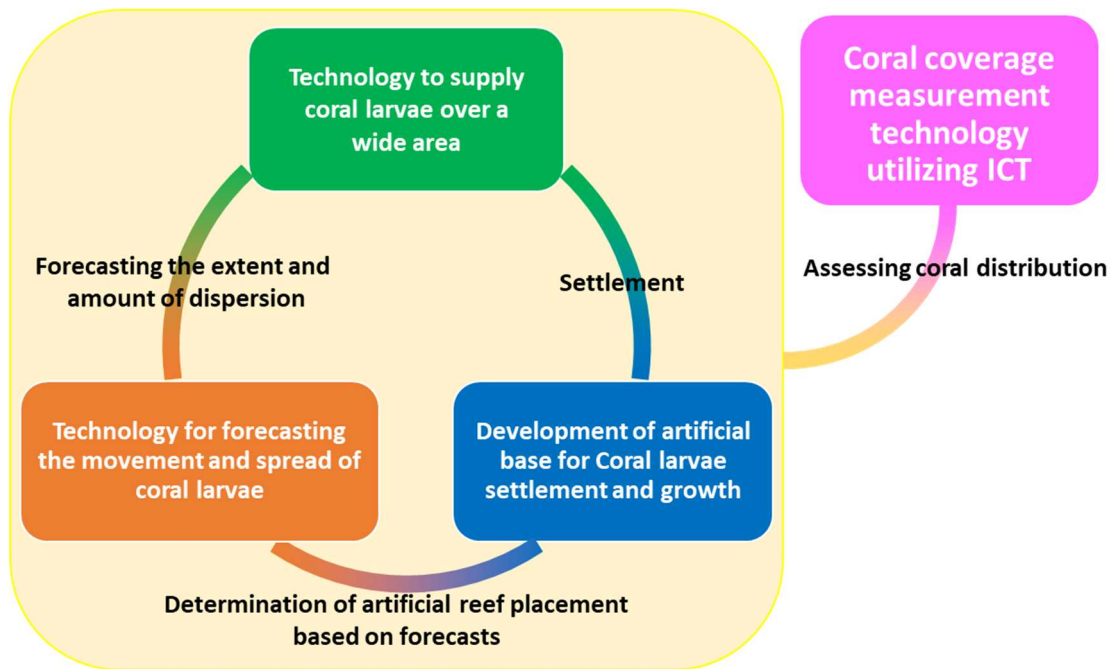


Figure 1 Relationships between each elemental technology

2. Technology for forecasting the movement and spread of coral larvae

(1) Summary

This technology uses a numerical simulation model to forecast the efficient and effective release sites, settlement sites, and settlement volumes of coral larvae.

The simulation model is an areal diffusion simulation model that combines a "flow model" that forecasts the flow field in the ocean during the period of coral spawning and release of coral larvae, alongside a "suspended larval migration model" that forecasts the behavior of larvae as they float along with the flow and subsequent settlement.

The methods for supplying coral larvae across a wide area can be broadly classified into two types (Fig. 2). One of these is the "coral larvae collection type," in which everything from larval collection to discharge is done artificially, whilst the other is the "direct release type," in which coral larvae are spawned and diffuse naturally from adult corals on the larvae-supplying artificial bases, aiming to settle on the artificial bases placed by forecast. An areal dispersion simulation model will be used to study discharge planning for both of these types.

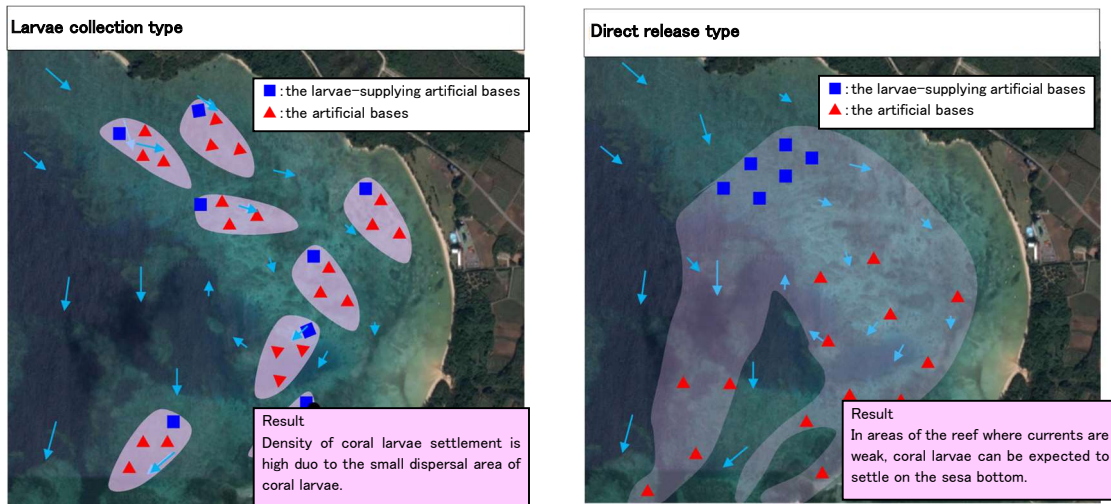


Figure 2. Diagram of the two types

(2) Effect

Planning of coral larvae discharge and forecasting larval settlement area using larvae collection type

The extent of coral larval supply and the amount of settlement by larval collection type varied depending on the height of the discharge, amount of discharge, etc. In other words, it is necessary to set the area and amount of settlement, whilst also planning for efficient and effective discharge.

The discharge demonstration test results using a numerical simulation model reproduced the larval dispersal range with an accuracy of approximately 90 % (Figures 3(1) and 3(2)). This allowed for efficient and effective planning of coral larval discharge.

Feasibility study of direct discharge type and applicability to placement planning of coral larva-supplying artificial base placement plans

The flow model was successfully used to forecast the average and representative current conditions based on meteorological and oceanographic data over the past 10 years in the target area. Furthermore, by using areal dispersal simulations, it is possible to forecast "from where (placement of larval supply Artificial base)" and "how many coral larvae we need to release (number of adult corals = scale of larval supply Artificial base)" in order to create a certain amount of larval settlement in the area where coral recovery is desired (Figure 3(3)).

As a result, it was possible to select between both larval supply methods for effective and efficient coral recovery.

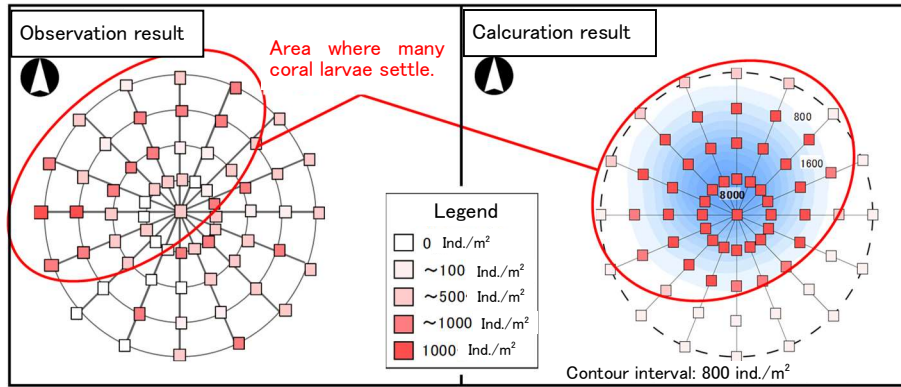


Figure 3(1) Reproduction calculation results of discharge by larval collection type (fixed type and intermittent mobile type) (Reproduction rate is 89 %)

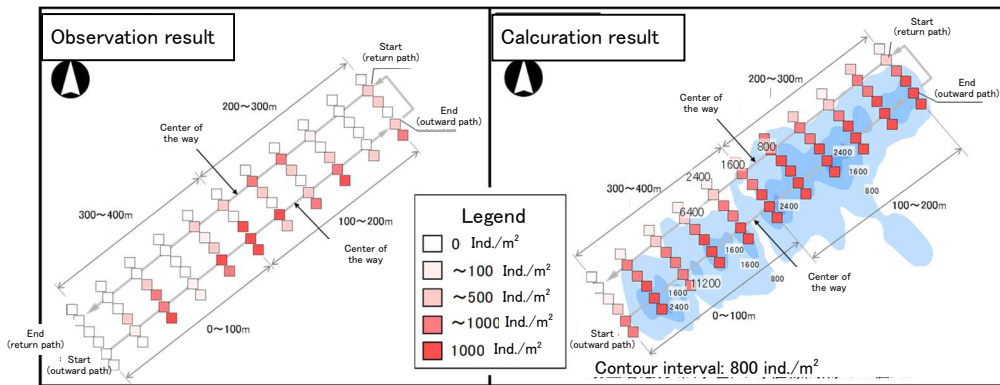


Figure 3(2) Reproduction calculation results of discharge by larval collection type (continuous mobile type) (reproduction rate is 92 %)

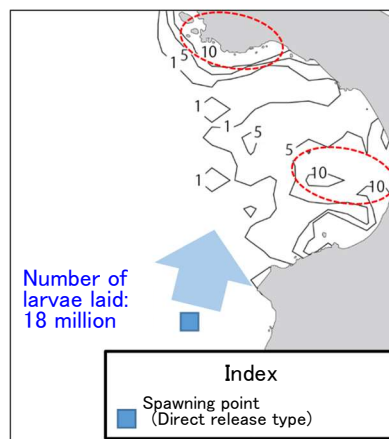


Figure 3(3) Forecasted larval settlement results for discharges using direct discharge type.

3. Development of Artificial base for Coral larvae settlement and growth

(1) Shape

Eight lattice-shaped substrates were installed on the steel bases designed for stability and

durability. The center of the base was a drainage area without a substratum to reduce the lifting force on the base.

Two types of substrates, flat and convex-concave, were developed. The flat type provided the advantages of having a simple geometry and lower cost compared to the convex-concave type. In construct, convex-concave types are more complex and somewhat more expensive, whilst having the advantages of being less likely to allow growing corals to contact each other and interfere with each other's growth.

The developed base measured 2,160 × 2,160 × 650 mm (W × D × H) for the flat type and 2,160 × 2,160 × 800 mm (W × D × H) for the convex-concave type. The convex-concave type is 150 mm higher, although the height to the lower level is 650 mm, which is the same as that of the flat type.



Figure 4: Shapes of two types (left: flat type, right: convex-concave type)

(2) Basic function

The base and substratum have many functions, listed below, to create a suitable environment for coral settlement and growth.

- ⑥ Lattice-shaped substratum ensures water permeability and prevents floating mud.
- ⑦ This lattice-shaped substratum also makes it difficult for fish and other predators to prey on juvenile corals inside the lattice.
- ⑧ Lattice-shaped substratum reduces intense light within the lattice.
- ⑨ The legs of the base are made of round steel ($\Phi 30\text{mm}$) to prevent COTS (crown - of - thorns starfish) from crawling up.
- ⑩ The height of the substratum was at least 650 mm, which reduced the damage caused by sand and gravel movement.



Figure 5: Juvenile corals growing inside a lattice

On the substrates used for the sea area demonstration, almost no mortality was observed,

even after three years of settlement, indicating that a high survival rate can be expected for corals that have settled on the substratum.

4. Technology to supply coral larvae over a wide area

(1) Summary

This method artificially supplies a large amount of coral larvae to artificial bases installed in an areal area using the aforementioned " technology for forecasting the movement and spread of coral larvae "(Figure 6). Considering mortality during the growth process and the fertilizable distance between adult corals, the target settlement density was set at 100 individuals/m².

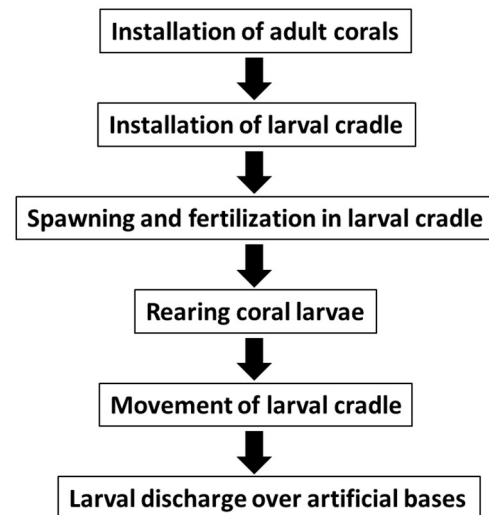


Figure 6: Flow of supplying coral larvae to a wide area

(2) Upgrading larval cradle

The larval cradle was modified to collect additional coral bundles and to supply large quantities of coral larvae.

As shown in Figure 7, a conical sheet was stretched over several bases on which the adult coral was placed, and the bundle rose to the larval cradle at the sea surface through the hoses. The bundle rises to the sea surface, pops, and sperm and eggs are subsequently released.

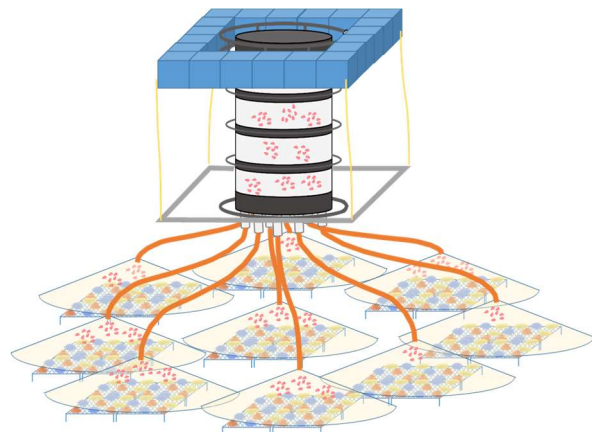


Figure 7: Upgraded larval cradle

(3) Larval discharge method

Larval discharge methods can be broadly divided into categories of fixed and mobile. Mobile discharge methods are further divided into intermittent and continuous methods, based on their movement patterns. In the intermittent mobile discharge method, larvae in the larval cradle are released multiple times, with the movement being repeated using the fixed discharge method. The continuous mobile discharge method discharges coral larvae while moving and requires greater technical skills than the intermittent mobile discharge method considering the need to adjust the speed and posture of the cradle during movement. In general, the difficulty increases in the following order: Continuous mobile

discharge, intermittent mobile discharge, and fixed discharge.

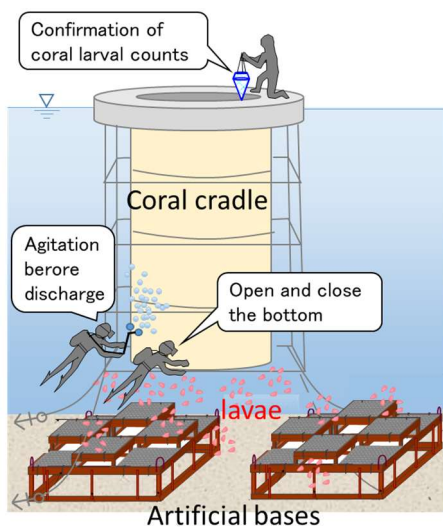


Figure 8: Fixed discharge method

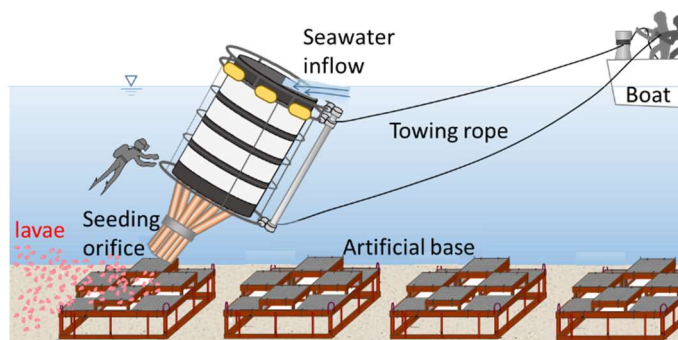


Figure 9: Continuous mobile discharge method

5. Coral coverage measurement technology using ICT.

(1) Summary

When implementing coral reef conservation and restoration activities, coral coverage measurement and the classification of distributed corals are conducted to assess the current status for confirmation of the initial conditions or results of activities.

Traditional methods, such as coral coverage measurement and coral classification by divers, are widely used; however, to expand the scale of activities, technology that can more efficiently assess the current status of a wide area is needed. Therefore, instead of visual observations by divers, coral measurement technology using an underwater camera attached to the bottom of a remote-controlled boat, and AI-based coral classification technology have been developed.



Figure 10: Appearance of remote-controlled boat

(2) Filming coral reefs using an underwater video camera

Coral reefs can be photographed using an underwater camera attached to a remotely controlled boat. In the demonstration test for this in the coastal waters of Okinawa, the filming lasted approximately 3.3 days/10 ha, indicating that the number of days required for filming could be reduced to approximately a quarter of that of the conventional method used by divers, which is approximately 18 days/10 ha.

In addition, by mosaicing still images cut from the video, we created a high-resolution image that clearly captured the detailed branch shapes of the coral.

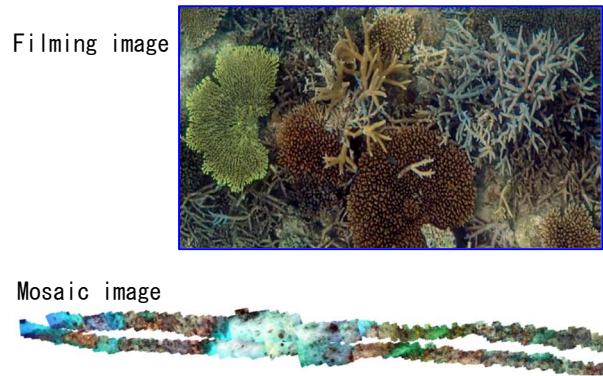


Figure 11: Filming and mosaic image

(3) AI-based Coral Classification technology (log)

We constructed an AI model to determine the distribution of corals from mosaic images. Considering that it is necessary to train high-quality teacher data, we created teacher data by polygonizing the area in detail using GIS software to capture the characteristics of the coral contours. In addition, the mosaic image before joining a piece has different color tones depending on the light conditions of the filming and the objects. However, the analysis accuracy can be further improved by standardizing the images as a pre-processing step. The results subsequently showed that the accuracy of the two coral/non-coral categories was greater than 80 %, whilst the accuracy of the species-specific categories was 85 % for columbous corals and 79 % for resinous corals.

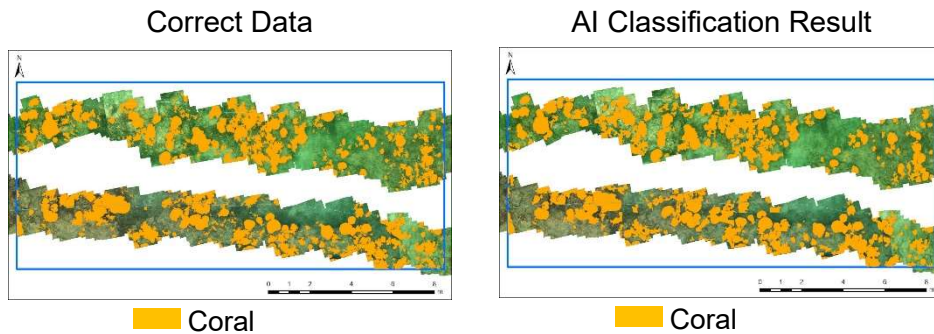


Figure 12: AI classification results (2 classifications)

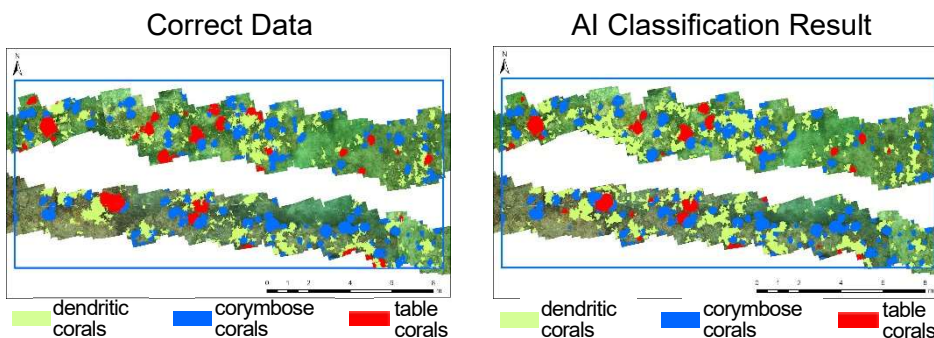


Figure 13: AI classification results (species-specific)

