

# 人工構造物を用いた新たな生息場の創造によるサンゴ礁生態系の再生

棚谷 灯子\*・桑江 朝比呂\*\*

## 要 旨

サンゴは熱帯・亜熱帯の海洋生態系の基盤生物であり、サンゴ礁生態系が供給する生態系サービスの経済的価値はあらゆる生態系の中で最も高いと推定される。しかし、近年の気候変動に伴う高水温により大規模なサンゴの白化が起こり、生態系の劣化が深刻化している。このため従来の保全策にとどまらず、生態系への積極的な介入によってサンゴ礁生態系の再生を試みる動きが世界各地で始まっている。本研究では、那覇港におけるサンゴの生息状況とこれまでに実施された生態系への介入の効果を調査し、人工構造物を用いた新たな生息場の創造が気候変動に対するサンゴ礁生態系の再生手段として有効かどうかを検証した。那覇港における過去 30 年分のサンゴに関する調査報告書から、防波堤と周囲の天然礁におけるサンゴの分布状況と周辺の環境条件等に関する過去データを抽出し整理した。さらにサンゴの着生に配慮した生物共生型防波堤において、サンゴ等の生物の生息状況と周囲の環境条件を調査した。これらのデータを用いて、サンゴの生育に適する環境条件、サンゴの生育に配慮した防波堤構造の効果、防波堤と天然礁のサンゴの着生状況を比較した。防波堤上でサンゴは浅い水深帯、適度に傾いた基盤上、光量が高い場所、目地近傍で多く分布していた。サンゴの生育に配慮した生物共生型防波堤では、浅場面積の拡大、防波堤部材の表面加工、目地幅の拡大の効果により通常の防波堤に比べて費用対サンゴ着生効果が約 10%増加した。生物共生型防波堤では人工タイドプール（ATP）の設置によるサンゴ面積の増加が最も大きく、サンゴ面積の増加分の約 40%を占めた。ATP の費用対サンゴ着生効果は、天然のサンゴ礁における移植等によるサンゴ生息場再生の同効果に匹敵していることから、ATP はサンゴ生息場の創出方法として有効であると考えられる。1998 年の大規模白化以降、防波堤のサンゴ被度は天然礁よりも高く、防波堤は周囲の天然礁で失われた生態系機能が維持していた。防波堤のサンゴ被度の回復速度（～6 年で被度 20–40%）は、近年のサンゴの大規模白化の周期（～6 年）と同程度であることから、防波堤では白化が繰り返し起こるとしてもサンゴ被度が回復し群集を維持しうることが示唆された。

**キーワード：**サンゴ礁生態系、生息場の再生、グリーンインフラ、生物共生型港湾構造物、気候変動対策

---

\* 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 主任研究官

\*\* 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 領域長

## Restoration of coral reef ecosystems by habitat creation on artificial structures

**Toko TANAYA\***

**Tomohiro KUWAE\*\***

### Abstract

Corals are the fundamental organisms of tropical and subtropical marine ecosystems and economic value of coral reef ecosystems (CREs) is estimated to be the highest of all ecosystems. However, high water temperatures due to climate change have caused mass coral bleaching, which has resulted in serious ecosystem degradation. To overcome this situation, many countries have begun to attempt to restore the ecosystems through interventions in addition to conventional conservation measures. This study examines the effects of interventions on CREs in Naha port, Okinawa, Japan to determine whether habitat creation on artificial structures is an effective means of restoring CREs in response to climate change. We collected historical data of coral distribution on breakwaters and surrounding natural reefs for the past 30 years. We also examined the environmental conditions and distribution of corals and other organisms on a pro-environment breakwater (PB) aiming the improvement of coral growth. Using these data, we investigated the environmental conditions suitable for coral growth, the effects of interventions on CREs, and the difference of coral abundance between breakwaters and surrounding natural reefs. Corals on breakwaters were more abundant in shallow water depths, moderately tilted substrate, high light conditions and around caisson joints. The coral abundance and ecosystem functions of PB were improved by increasing shallow area, surface treatment and width of caisson joints. The cost-effectiveness of coral area expansion of PB was increased by up to ~10% compared to a conventional breakwater. The largest increase in coral area of PB was achieved by artificial tide pools (ATPs), which accounted for ~40% of the increase in coral area. As the cost-effectiveness of ATP is comparable to that of transplantation to natural reefs, ATPs are a cost-effective method for coral habitat restoration. After mass coral bleaching in 1998, breakwaters have had higher coral cover than surrounding natural reefs, maintaining the ecosystem functions that were lost in the natural reefs. The rate of recovery of coral cover on breakwaters (20–40% in ~6 years) corresponds to the return times of recent severe bleaching events (~6 years), suggesting that coral communities can be maintained despite the repeated bleaching events. These results indicate that habitat creation on breakwaters is an effective means of restoring CREs against climate change.

**Key Words:** coral reef ecosystem, habitat restoration, green infrastructure, pro-environment breakwater, climate change measures

---

\* Senior Researcher, Coastal and Estuarine Environment Research Group

\*\* Director of Department, Coastal and Estuarine Environment Department

## 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 要 旨 .....                     | 1  |
| 1. まえがき .....                 | 4  |
| 2. 研究手法 .....                 | 5  |
| 2.1 調査地域 .....                | 5  |
| 2.2 生物共生型防波堤の構造 .....         | 5  |
| 2.3 過去データの整理 .....            | 7  |
| 2.4 防波堤における追加調査 .....         | 7  |
| 2.5 防波堤の費用対サンゴ着生効果の試算 .....   | 10 |
| 3. 結果 .....                   | 22 |
| 3.1 防波堤の環境条件とサンゴの着生状況 .....   | 22 |
| 3.2 生物共生型防波堤構造の効果 .....       | 22 |
| 3.3 防波堤と天然礁のサンゴ着生状況の比較 .....  | 24 |
| 4. 考察 .....                   | 44 |
| 4.1 サンゴの生育に適する環境条件 .....      | 44 |
| 4.2 サンゴの生育に配慮した防波堤構造の効果 ..... | 44 |
| 4.3 防波堤と天然礁のサンゴの着生状況の比較 ..... | 47 |
| 4.4 気候変動に対するサンゴ礁生態系再生手法 ..... | 47 |
| 5. あとがき .....                 | 50 |
| 謝辞 .....                      | 50 |
| 参考文献 .....                    | 50 |
| 用語リスト .....                   | 55 |
| 付録 .....                      | 56 |

## 1. まえがき

サンゴは熱帯・亜熱帯の海洋生態系の基盤となる生物である。サンゴは動物であるが、体内に共生する褐虫藻の光合成によって高い一次生産力を誇り、多くの生物を支えている。また、サンゴは炭酸カルシウムの複雑な骨格を形成し、多様な生物のすみかを提供している。サンゴは生物の生息場となるだけでなく、サンゴの骨格やその死骸である砂礫が積み重なってできるサンゴ礁は炭酸塩地盤として熱帯・亜熱帯域の島の国土を形成し、海岸の砂浜の元となり、領海や排他的経済水域の基準となる低潮線を形作っている。さらにサンゴ礁の浅い地形は外洋からの波のエネルギーの 9 割以上を減衰させ (Ferrario et al., 2014)、海底を生きたサンゴが覆うことによる粗度の増加によっても波浪が減衰する (Harris et al., 2018)。多種多様な生物が生息するサンゴ礁生態系は観光資源や漁業資源としても利用されている (Cesar and van Beukering, 2004; Grafeld et al., 2017; Spalding et al., 2017)。こうした生物多様性を基盤とする生態系から人間が得られる様々な恵み (便益) を生態系サービスと呼ぶ。サンゴ礁生態系が供給する生態系サービスの経済的価値はあらゆる生態系の中で最も高いと推定されている (De Groot et al., 2012)。

しかしながらサンゴ礁生態系は環境変化に対して非常に脆弱であり、とりわけ近年の気候変動に伴う高水温によって大規模なサンゴの白化がおり、生態系の劣化が深刻化している (Hughes et al., 2018b)。日本最大のサンゴ礁である沖縄県の石西礁湖において、2016 年に 90% のサンゴが白化し 70% が死滅するという深刻な被害を受けた (環境省, 2017)。気候変動によるサンゴ礁生態系の劣化は、水質改善、食害生物の駆除、海洋保護区の設定など従来の地域的なストレス軽減の取り組みだけでは太刀打ちできなくなっていると指摘されている (Hughes et al., 2017a; MacNeil et al., 2019; Morrison et al., 2020)。こうした状況を踏まえて、気候変動からサンゴ礁生態系を守るため、従来の保全策とは異なる、個体、群集、生態系への積極的な介入によって生態系の再生を試みることの必要性が指摘されている (Ainsworth et al., 2019; Anthony et al., 2017; Hughes et al., 2017b; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019; Van Oppen et al., 2015)。介入として、個体レベルでは遺伝子操作や生物合成 (高温耐性サンゴの創出など) (Van Oppen et al., 2017)、個体群レベルでは高温域のサンゴを低温域に移植するなどの遺伝子フローの促進 (Howells et al., 2013; Palumbi et al., 2014) が、生態系レベルでは人工的な生息場の創造 (Habitat engineering) (Anthony et al., 2017) や遮光や局所的な冷却

による高水温の緩和 (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019) などが考えられている。これらのうち本稿と直接関連する人工的な生息場の創造としては、サンゴ着生の基盤として天然のサンゴ礁に人工の岩礁や、コンクリートブロック、鉄筋構造物を設置した例 (Fox, 2005; Faldi et al., 2012; Williams et al., 2019) や、人工リーフにサンゴが着生した例 (Perkol-Finkel and Benayahu, 2004) などが挙げられる。しかし防波堤、港、洋上風力発電の風車や石油・天然ガスの生産設備などのエネルギープラットフォーム、沈船などの人工構造物は生態系再生以外の目的のために設置されているため、生物生息場としての機能はしばしば構造物が撤去されるまでの二次的な価値としてしか認識されていない (Schläppy and Hobbs, 2019)。また、人工構造物による生態系への介入の効果について、長期間に渡る調査解析はこれまでほとんど行われていない。

一方で、人工構造物へのサンゴの着生は、生態系の再生という観点だけでなく、自然環境が有する多様な機能をインフラ整備に活用するグリーンインフラの観点からも重要である。グリーンインフラは、防災減災のみならず水質改善や水産・観光資源、炭素貯留といった多様な機能が相乗する便益 (コベネフィット) を提供できる (Sutton-Grier et al., 2015)。既存のグレーインフラとグリーンインフラを組み合わせたハイブリッド型インフラでは、両者の特性を活かし、信頼性の高い防災減災機能を発揮しつつグレーインフラ単体では実現できないコベネフィットを提供しうるが、その効果に関する実証的な研究はほとんどない (Kuwae and Crooks, 2021)。生物共生型防波堤は、港内静穏度の確保など港湾構造物の基本的な機能を有しながら、干潟や磯場などの生物生息場の機能を併せ持つ港湾構造物 (国土交通省港湾局, 2014) であり、グレーインフラとグリーンインフラを組み合わせたハイブリッド型インフラとみなせる。平成 30 年の港湾の施設の技術上の基準 (技術基準) の改正により、防波堤、護岸、岸壁及び棧橋の省令・告示に「環境の保全を図ること」が追加され、生物共生型港湾構造物の重要性が増している (国土交通省港湾局, 2018a)。ハイブリッド型インフラでは防災減災機能と経済性がグレーインフラとグリーンインフラの中間に位置し、食糧生産、生物多様性などの二次的な効果が付加されるため、インフラの費用対効果が高まることが期待されるが (Royal Society, 2014)、その費用対効果についての定量的な研究は限られている (Ferrario et al., 2014; Narayan et al., 2016)。

沖縄県的那覇港では、1976 年に防波堤の整備が始められて以降港湾構造物に着生するサンゴに関する調査が行

われてきた。1989 年以降、防波堤上に豊かなサンゴ群落  
が形成されていることが確認されてから（森田ら、1992）、  
港湾構造物へのサンゴの着生を促進するための様々な取  
り組みが実施され、人工構造物に着生するサンゴに関す  
る豊富なデータが蓄積されている。山本ら（2002）は那覇  
港内の人工構造物上の 18 年間のサンゴ被度の調査結果を  
元にサンゴ群集の成長過程と環境条件との関係を解析し、  
人工構造物上のサンゴの生育に適する堤前波高、水温、水  
質などの環境条件を整理した。しかしながら、こうしたサ  
ンゴの生育に適する環境条件を構造物の設計に反映する  
ために必要な基盤の設置水深や基盤傾度などの条件とサ  
ンゴの着生状況との関係について、一般的な傾向は明ら  
かになっていない。吉見ら（1998）は、1998 年の大規模  
白化前までの人工構造物へのサンゴの着生過程、着生基  
盤の表面加工の効果に関する調査結果をとりまとめ、人  
工構造物上の浅い水深帯ではミドリイシ属の生育が速く  
サンゴ群集の生育が速やかであること、着生基盤の凹凸  
加工や海水交換がサンゴの初期着生、成長を促進してい  
る可能性を指摘し、サンゴの着生に配慮した防波堤の構  
造上の工夫としてブロックの凹凸加工、防波堤の港内外  
の海水交換の促進を目的とした通水部を設けること、サ  
ンゴの成長が速い浅場面積の拡大を提案した。ブロック  
の凹凸加工については、消波ブロックの 5 mm, 10mm 幅の  
凹凸加工区において少なくとも施工後 6 年目までサンゴ  
の着生が促進されることが報告されている（三宅ら、2006;  
Mackouchi et al., 2008）。しかしこれらの報告以降、消波ブ  
ロックの表面加工の長期的な効果は明らかになっていな  
い。また、吉見ら（1998）で提案されたサンゴの着生に配  
慮した構造を取り入れて 2012 年以降に整備された生物共  
生型防波堤に関する調査解析はこれまで行われておらず、  
消波ブロック以外の防波堤部材の表面加工や通水部、浅  
場面積の拡大など生態系に対する介入の効果は明らかにな  
ってない。加えて、人工構造物へのサンゴの着生を、今  
後の気候変動に対するサンゴ礁生態系再生手法として位  
置づけるためには、周囲の天然のサンゴ礁の着生状況と  
の比較、とりわけ大規模白化後の回復過程の比較が重要  
であるが、こうした検討はこれまで行われていない。

こうした状況を踏まえ、本研究ではこれまで那覇港で  
行われてきたサンゴに関する調査結果を網羅的に整理す  
るとともに、生物共生型防波堤におけるサンゴ等の着生  
状況を調べ、人工構造物におけるサンゴの生育に適する  
環境条件とサンゴの生育に配慮した防波堤の部材の効果  
について包括的に調査解析を行った。さらに防波堤と天  
然礁のサンゴの着生状況を比較することで、人工構造物  
を用いた新たな生息場の創造の気候変動に対するサンゴ

礁生態系の再生手段としての有効性を検証した。

なお、本稿は Coastal Engineering journal で出版された論  
文”Improvement of the coral growth and cost-effectiveness of  
hybrid infrastructure by an innovative breakwater design in  
Naha Port, Okinawa, Japan.” (Tanaya et al. 2021) と Scientific  
reports で出版された論文”Artificial structures can facilitate  
rapid coral recovery under climate change.” (Tanaya et al, 2025)  
の一部を和訳し、データの解析を加えて加筆したもので  
ある。

## 2. 研究手法

### 2.1 調査地域

調査地域は沖縄本島南部の西海岸に位置する那覇港  
（沖縄県那覇市・浦添市）である（図-2.1（a）  
（b））。那覇港には那覇ふ頭、泊ふ頭、新港ふ頭、浦添  
ふ頭があり、主要な防波堤として那覇防波堤、新港第一  
防波堤、浦添第一防波堤が整備されている。防波堤の周  
囲には浅ノ瀬、干ノ瀬、自謝加瀬、浦添天然礁などの天  
然のサンゴ礁が存在している（図-2.1（c））。浦添第一  
防波堤の東端の延長 120m 区間（幅 20 m の鉄筋コンクリ  
ート製の箱状の構造物（ケーソン）6 函分）にはサンゴ  
の生育に配慮した生物共生型防波堤（Pro-environment  
breakwater）が整備されている（図-2.1（d））。次項に生  
物共生型防波堤の構造の詳細を述べる。

### 2.2 生物共生型防波堤の構造

図-2.2 に通常の防波堤（上部斜面堤）、図-2.3 に生物共  
生型防波堤のアイソメトリック図（等角投影図、X、Y、  
Z 軸の間隔が 120°になるように立体を投影した図、立体  
の高さ、幅及び奥行きが同じ寸法で描かれている）を示す。  
通常の防波堤（図-2.2）に対して、生物共生型防波堤では  
（1）人工タイドプール、（2）マウンド（石を積み上げて  
作られる防波堤の土台）の嵩上げ、（3）通水型ケーソン、  
（4）消波ブロック、ケーソン、被覆ブロック、根固方塊  
表面の凹凸加工が施されている（図-2.3）。

人工タイドプール（Artificial tide pool (ATP)）は、サン  
ゴ等の生息に適した浅場を広く確保し、サンゴの加入成  
育を促進する効果を期待してケーソンの港内側の小段に  
設けられた柵状の構造物である（図-2.4）。平時は水没し  
ているが、低潮位時には縁が干出し、タイドプール（潮溜  
まり）となる（図-2.4（a））。ATP は、サンゴが多く着生  
するタカセガイ養殖礁（Omori et al., 2006; Omori et al., 2007）  
を模した構造物である。ATP の縁の上面の高さ（ATP の  
天端高）は朔望平均干潮面（Low Water Level (LWL)）を

基準として、LWL+1.0 m または LWL+ 0.7 m となっており、大潮の干潮時に数時間潮溜まりとなるように設計されている。ここで LWL は那覇港の工事用基準面 (DL) とほぼ等しく、那覇港の DL の標高は、東京湾平均海面 (TP) を基準として  $DL0\text{ m} = TP - 1.24\text{ m}$  である。設計図面上の柵の内径は、ケーソンの延伸方向の幅が 465 cm、直交方向の幅が 380–400 cm、柵の深さが 50–65 cm である (図-2.5)。柵の底面中央部の蓋コンクリートの上面には加工が施されており、底面の加工の種類は (1) 幅 10 mm もしくは 30 mm の凹凸加工を施したもの (図-2.4 (b), (c), (g), (h)), (2) FRP (Fiber Reinforced Plastic, 繊維強化プラスチック) 製の格子サイズ 40 mm のグレーチング (格子状の構造物) (図-2.4 (d), (f)) が設置されているもの、(3) 無加工のもの (図-2.4 (e)) の 3 種類がある。各柵の凹凸加工部もしくは FRP グレーチングの設置面積は約 6 m<sup>2</sup> である。

嵩上げマウンドは、サンゴの生息に適した浅場の面積を拡大することを目的として、防波堤港内側のマウンドを嵩上げたものである。浦添第一防波堤では通常の防波堤の港内側のマウンドの天端高が LWL-11.62 m であるが、生物共生型防波堤ではマウンドを 5~7 m 程度嵩上げし、マウンドの天端高が LWL-7 m もしくは LWL-5 m となっている。

通水型ケーソンは、港内の海水交換の促進に配慮し、隣り合うケーソンの隙間 (目地) の切り欠き幅を広げたケーソンである (図-2.6)。ケーソンとケーソンの間の隙間 (目地) は通常 10 cm 程度であるが、通水型ケーソンでは、目地部の切欠き幅が 1 m 前後まで広がっている。浦添第一防波堤では、目地部の切り欠き幅が港内側嵩上げマウンドの約 2 m 上方までは 52–90 cm、その下部では鉛直方向 2 m に渡ってさらに目地幅が広い通水部が設けられており、通水部の目地幅 110–173 cm となっている。

生物共生型防波堤では、消波ブロック、ケーソン、被覆ブロック、根固方塊の表面の一部に凹凸加工が施されている。凹凸加工消波ブロックは、ブロック表面のコンクリートが固まらないうちに型押し板を当てる、もしくは型枠内に溝型のウレタンフォームを張り付けることにより、ブロック表面に幅 10 mm もしくは 30 mm の凹凸加工を施したものである。加工区は四角形で、型枠加工による 350 mm×400 mm の加工区が 4 つ、350 mm×280 mm の加工区が 2 つ、型押し加工による 500 mm×500 mm の加工区が 2 つ施されており、1 ブロックあたり 8 つの加工区がある (図-2.7)。ケーソンの港内側の直立壁面の一部には凹凸加工プレートを貼付することで、壁面に凹凸加工を施している (図-2.8 (c))。凹凸加工プレートは、幅 10 mm

もしくは 30 mm の凹凸加工を施したモルタル製のプレートである。プレートは、縦横幅が 300 mm の正方形で、10 mm 凹凸加工プレートの厚さは 40 mm、30 mm 凹凸加工プレートの厚さは 60 mm である (図-2.8 (a), (b))。凹凸加工被覆ブロックは、港内側に設置される 30t 型の被覆ブロック上面に型枠を押し当てて幅 10 mm もしくは 30 mm の凹凸加工を施したものである。ブロック 1 個につき 500 mm×500 mm の加工区が 2 つ施されている。凹凸加工根固方塊は、港内側に設置される根固方塊の上面に型押しによる幅 10 mm もしくは 30 mm の凹凸加工を施したものである。ブロック 1 個につき 1000 mm×500 mm の加工区が 2 つ、1000 mm×1000 mm の加工区が 1 つ施されている。

図-2.9 に浦添第一防波堤の生物共生型防波堤の施工状況と各ケーソン、ATP の名称を示す。生物共生型防波堤の整備区間には幅 20 m の通水型ケーソンが 6 函配置され、防波堤港外側の LWL 0~12 m の表層の一部に凹凸加工消波ブロックが設置されている。防波堤港内側には ATP、嵩上げマウンド、凹凸加工パネル、凹凸加工被覆ブロック、凹凸加工根固方塊が設置されている。ATP は 1 ケーソンあたり 4 柵整備されている。整備区間の東端から 1~3 函目のケーソン (St.1~St.3) では、ATP の天端高が LWL +1.0m、嵩上げマウンドの天端高が LWL -7m となっている。ATP の底面加工は St.1 では FRP グレーチング、St.2 では 30 mm 凹凸加工と 10 mm 凹凸加工のものが 2 柵ずつ、St.3 では無加工となっている。整備区間の東端から 4~6 函目のケーソン (St.4~St.6) では、ATP の天端高が LWL+0.7m、嵩上げマウンドの天端高が LWL -5m となっている。ATP の底面加工は St.4 では FRP グレーチング、St.5 では 30 mm 凹凸加工と 10 mm 凹凸加工のものが 2 柵ずつ、St.6 は無加工となっている。ATP の各柵の名称は各ケーソンの東端の柵から順に 1~4 の番号を振り、St.名の後ろにハイフンと柵の番号をつけて表す。(例えば St.1 の東端の ATP の柵は St.1-1 とする。) 凹凸加工パネルは St.1 と St.4 のケーソン港内側の直立壁面に 30 mm 凹凸加工、St.2 と St.5 のケーソン港内側の直立壁面に 10 mm 凹凸加工のパネルが設置され、St.3 と St.6 には設置されていない。パネルの設置水深は St.1 と St.2 では LWL -3.5~6.0 m、St.4 と St.5 では LWL -1.6~3.9 m となっている。根固方塊は St.1 と St.4 では 30 mm 凹凸加工、St.2 と St.5 では 10 mm 凹凸加工、St.3 と St.6 では無加工のものが設置されている。30t 型の被覆ブロックは St.4 に 30 mm 凹凸加工、St.5 に 10 mm 凹凸加工、St.6 に無加工のものが設置されている。

### 2.3 過去データの整理

沖縄総合事務局が実施した那覇港のサンゴに関する調査報告書から、那覇港の防波堤と天然礁におけるサンゴの着生状況と環境条件に関する過去データを整理した。

表-2.1 に那覇港におけるサンゴに関する調査報告書一覧を示す。昭和 51 年度から平成 30 年度にかけて那覇港で行われたサンゴに関する調査報告書 53 冊を確認した。

これらの報告書について (1) 生データがあること、

(2) 水深の基準が明確であること、(3) 調査年度や場所間の相対比較が可能であることを条件として解析に使用する報告書やデータの絞り込みをおこなった。(1) については、報告書によっては過年度の報告書データの編集結果のみが記載され生データがない場合があり、このような報告書は整理対象外とした。(2) について、防波堤もしくは天然礁におけるサンゴの生息に適した水深を検討するため、調査地の水深の基準 (LWL 基準) が明確であるものだけを対象とした。調査時の実水深のみであって、調査時刻およびその時の潮位が不明であるなど、LWL 基準に換算できない場合は対象外とした。(3) につ

いては、移植に適したサンゴに関する調査など、現況把握のための調査ではなく、移植可能なサンゴなどの偏った調査データは検討対象から除外した。その結果、天然礁および人工構造物のデータが記載された報告書として、1989 年度から 2018 年度にかけて行われた調査報告書 27 冊が抽出された。1996 年度は那覇港防波堤周辺環境整備検討調査、それ以外の年度では那覇港防波堤周辺環境調査の報告書が採択された。1997 年度から 1999 年度にかけては採択基準に見合う調査報告書が存在しなかった。表-2.2 に那覇港におけるサンゴに関する調査項目一覧を示す。調査は、定点に方形枠 (コドラート) を設置し、方形枠内のサンゴの分布状況を記録するコドラート法、測線に沿って測線の両側のサンゴの分布状況を一定間隔で記録するベルトトランゼクト法、調査地点の周辺 (半径 10 m 程度) を遊泳してサンゴの分布状況を記録するスポットチェック法、調査員を船舶で曳航しながら調査範囲のサンゴの分布状況を記録するマンタ法などで行われている。表-2.3 に整理したデータ項目の一覧を示す。サンゴ被度は底面をサンゴが被覆する比率 (%), サンゴ総被度はソフトコーラル (硬い骨格を持たないサンゴ) を除くサンゴ被度の合計値 (%) を表す。サンゴ総被度、種類別被度データの整理にあたっては、被度が実数値の場合はそのまま採用し、概略調査等において被度がある値の範囲で記録されている場合は中央値を採用した。調査が行われている場所で被度が確認できない場合は被度 0% とし、調査を行っていない場合はデータな

しとして明確に区別した。被度 1%未満を表す「R」は被度 0.5%, 被度 1~5%未満を表す「+」は被度 3%として扱った。このため、総被度と種別被度の合計値は必ずしも一致しない場合がある。サンゴ種類別被度の総被度全体に占める比率は、種類別被度の合計値を母数 (総被度) として求めた。

### 2.4 防波堤における追加調査

過去データで不足していたケーソン港内側直立壁面のサンゴの分布状況に関する調査や、過去に調査が行われていなかった生物共生型防波堤において、サンゴ等の生物の生息状況に関する調査を行った。特にサンゴの生息状況が良い港内側の人工タイドプール (ATP) において詳細な調査を行い、サンゴ等の分布状況のマッピング、サンゴの成長速度や環境条件の測定、魚類や大型底生生物の個体数などに関する調査を行った。

#### (1) 港内側直立壁面のサンゴ分布調査

過去データにおいて不足していた防波堤港内側直立壁面のサンゴ分布状況の把握と、ケーソンの目地部および通水型ケーソンのサンゴ生育に対する効果の把握を目的として、2017 年~2018 年にかけて浦添第一防波堤の通水型ケーソンとその東西に隣接する通常型ケーソンの港内側直立壁面においてサンゴの分布調査を行った。通常型ケーソン 11 ヶ所と通水型ケーソン 7 ヶ所の目地部の両側の LWL 0 m を上端とし、LWL-7 m (港内側マウンドが嵩上げされた場所では LWL-5 m) を下端とした範囲において、1 m 四方の方形枠 (コドラート) を壁面にあて、方形枠の全体写真とサンゴ同定用に方形枠内の拡大写真を撮影し、サンゴの分布状況を記録した。方形枠を当てた水深に対応する目地幅の計測も行った。目地部の調査を行った通常型ケーソンと通水型ケーソンのうち各 6 ヶ所の目地の右側 (東側) では、幅 20 m のケーソンの目地からの距離が 5~6 m, 10~11 m (ケーソン中央部) の区間において、目地部と同じ水深帯で同様にサンゴの分布調査を行った。

さらに、ケーソン港内側直立壁面に添付された凹凸加工パネルの効果を把握するため、2019 年に浦添第一防波堤の港内側直立壁面で追加のサンゴ分布調査を行った。10 mm 凹凸加工区、30 mm 凹凸加工区、無加工区の 3 ケースの 2 つの水深帯 (港内側マウンド天端高 LWL-5 m の区間では LWL-2~3 m, 港内側マウンド天端高 LWL-7 m の区間では LWL-4~5 m) において過年度に調査が行われた区画を除く各ケース 16 区画、合計 96 区画で調査を行った。過年度と同様に 1 m 四方の方形枠内

のサンゴの分布状況を記録した。

1 m<sup>2</sup>の方形枠の全体写真を画像編集ソフト (Photoshop (Adobe Inc.製)) で読み込み、方形枠とサンゴの生存部の輪郭を囲った画像を作成した。続いて画像解析ソフト (ImageJ; Schneider et al. 2012) を用いて、方形枠の1辺の長さを 100 cm として指定し、各サンゴの面積 (cm<sup>2</sup>) を相対的に算出した。本解析で用いた写真の1ピクセルあたりの面積はおよそ 0.001 cm<sup>2</sup>であり、2019 年度の調査において同定したサンゴの最小面積は 0.584 cm<sup>2</sup> (被度 0.006%) であった。加工区における被度の算出にあたっては、1 m 方形枠内のうち凹凸加工プレートが脱落した部分については、脱落範囲の面積を求め、1 m<sup>2</sup> から差し引いた値を母数とした。加工区外にはみ出たサンゴ生残部、明らかに加工区外から伸長したと考えられるサンゴ生残部は対象外とした。

通水型ケーソンのサンゴの生育に対する効果を検証するため、ケーソンと水深に対応があり目地からの距離が異なる 3 群のサンゴ被度の差を Wilcoxon の符号順位検定で比較した。凹凸加工パネルの効果については、2 つの設置水深帯ごとに 10 mm 凹凸加工区、30 mm 凹凸加工区、無加工区のサンゴ被度を多重比較した。各群の正規性、等分散性を確認し、必要な場合はデータの四乗根をとって変換した上で検定を行った。データの正規性、等分散性が仮定できる場合は Tukey の HSD 検定、仮定できない場合は Steel-Dwass 検定を用いて群間の差を比較した。

## (2) 港外側凹凸加工消波ブロックのサンゴ分布調査

消波ブロックの表面加工のサンゴ生育に対する効果を検証するため、浦添第一防波堤の港外側に設置された凹凸加工消波ブロックの加工区と無加工区のサンゴ分布状況を調べた。浦添第一防波堤の生物共生型防波堤整備区間の港外側に設置された凹凸加工消波ブロックの LWL-1〜-6 m の範囲において、10 mm 凹凸加工区とそれに隣接する無加工区、30 mm 凹凸加工区とそれに隣接する無加工区の各 20 区画、合計 80 区画でサンゴ分布状況を記録した。各加工区に対応する無加工区については、選定した加工区と同じ消波ブロックとし、基本的に同じ面で無加工区を設定した。現地において 50 cm 四方の方形枠を消波ブロック表面にあて、方形枠の全体写真とサンゴ同定用に方形枠内の拡大写真を撮影した。画像編集ソフト (Photoshop (Adobe Inc.製)) で方形枠の全体写真を読み込み、方形枠とサンゴの生存部の輪郭を囲った画像を作成した。画像解析ソフト (ImageJ; Schneider et al. 2012) を用いて、方形枠の1辺の長さを 50 cm として指

定し、各サンゴの面積 (cm<sup>2</sup>) を相対的に算出した。本解析で用いた写真の1ピクセルあたりの面積はおよそ 0.001 cm<sup>2</sup>であり、同定したサンゴの最小面積は 0.153 cm<sup>2</sup> (被度 0.012%) であった。被度の算出にあたっては、50 cm 方形枠内のうち加工区範囲の面積を求め、母数とした。加工区外にはみ出たサンゴ生残部、明らかに加工区外から伸長したと考えられるサンゴ生残部は対象外とした。

消波ブロック表面の凹凸加工のサンゴの生育に対する効果を検証するため、10 mm 凹凸加工区と無加工区、30 mm 凹凸加工区と無加工区のサンゴ被度の差を Wilcoxon の符号順位検定で比較した。

## (3) ATP のサンゴ等の生物の分布調査

ATP 全 24 桁 (桁の天端高が LWL+1.0 m と LWL+0.7 m の 2 水深、各水深で FRP グレーチング加工区 4 桁、30 mm 凹凸加工 2 桁、10 mm 凹凸加工 2 桁、無加工 4 桁ずつ) においてサンゴ等の生物の分布調査を行った。対象とした生物はサンゴ、ソフトコーラル、海藻類、魚類、大型底生生物である。サンゴ、ソフトコーラル、海藻類については ATP の内側の底面・側面および枠の上面の分布状況をマッピングした。各 ATP の壁面を等距離で写真撮影し、壁面毎の複数枚の写真を Photocsaan (Agisoft 社製) および Photoshop (Adobe 社製) を用いて各壁面 1 枚の写真に合成した。設計図面や実際の計測値から ATP 展開模式図 (図-2.10) を作成し、合成写真を展開模式図に合うように各面写真を調整して貼り付けた。展開模式図上の合成写真より、サンゴ、ソフトコーラル、海藻類の各生物群を同定し、マッピング図を作成した。サンゴについては属別、群体形別の分類を基本とし、同定可能なものは種まで記録した。種名や属名が不明なものを再度現地調査で確認し、マッピング図に反映した。作成したマッピング図を画像解析ソフト (ImageJ-Fiji; Schindelin et al. 2012) に読み込み、ATP の底面の一边の長さを設計図面上の値に指定して1ピクセルあたりの長さを図ごとに指定し、サンゴの輪郭を囲って各サンゴの面積 (cm<sup>2</sup>) を求めた。ATP の各壁面 (底面、左側面、右側面、沖側面、岸側面、左上面、右上面、岸上面 (図-2.10)) と底面中央の加工区についても同様に面積 (cm<sup>2</sup>) を求めた。各壁面のサンゴ面積の合計値を各壁面の面積で割って各壁面のサンゴ被度 (%) を求めた。ATP の各桁のサンゴ被度 (%) は全壁面のサンゴ面積の合計値を全壁面面積で割って求めた。魚類と大型底生生物は各桁で観察された個体数を種類別に記録した。

各 St.や各壁面のサンゴ被度、大型底生生物と魚類の

個体数について、各群の等分散性を確認し、必要な場合は対数変換を行った上で多重比較を行い、Tukey の HSD 検定により平均値の差を検定した。ATP の底面の加工部と無加工部のサンゴ被度の差は、各群の正規性が仮定できる場合は対応のある 2 標本 t 検定、正規性が仮定できない場合は Wilcoxon の符号順位検定で比較した。

#### (4) ATP のサンゴ礁生態系の成長速度の推定

ATP において採水を行い、水質変化からサンゴ礁生態系の成長速度と水温、光量との関係を調べた。

サンゴや石灰藻等の石灰化生物が炭酸塩の骨格を形成すると、水中の重炭酸イオンが消費される。したがって、重炭酸イオンおよびそれと平衡状態にある水中の無機炭酸系 (TA) の濃度の時間変化を調べることで、石灰化生物による石灰化速度を求めることができる。

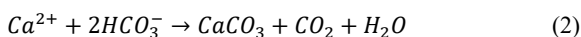
TA ( $\text{mmol kg}^{-1}$ ) は水に溶けている弱酸 (主に炭酸) とバランスする陽イオンの電荷量の濃度であり、下式で表される。

$$TA = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] \pm \text{minor compound} \quad (1)$$

ここで  $[\text{HCO}_3^-]$  は重炭酸イオンの濃度 ( $\text{mmol kg}^{-1}$ )、 $[\text{CO}_3^{2-}]$  は炭酸イオンの濃度 ( $\text{mmol kg}^{-1}$ )、 $[\text{OH}^-]$  は水酸化物イオンの濃度 ( $\text{mmol kg}^{-1}$ )、 $[\text{H}^+]$  は水素イオンの濃度 ( $\text{mmol kg}^{-1}$ )、 $[\text{B}(\text{OH})_4^-]$  はテトラヒドロキシホウ酸イオンの濃度 ( $\text{mmol kg}^{-1}$ ) である。テトラヒドロキシホウ酸イオン等の寄与分は塩分などで近似して求める

(Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001)。minor compounds は TA にほとんど寄与しない微量な陽イオン、陰イオン成分 (リン酸イオン、珪酸イオン、アンモニウムイオン、硫化水素イオン、硫酸イオン、フッ化水素) の総称で、これらのイオン濃度は 0 として TA を計算した。

サンゴ等による石灰化は下記の化学反応式で表される。



ここで、 $\text{Ca}^{2+}$  はカルシウムイオン、 $\text{CaCO}_3$  は炭酸カルシウム、 $\text{CO}_2$  は二酸化炭素、 $\text{H}_2\text{O}$  は水である。上式より、石灰化により 1 mol の炭酸カルシウムが形成される際に、TA は 2 mol 減少することが分かる。光合成や呼吸などの反応は基本的に TA に影響を与えないため、TA の時間変化から ATP 生態系の正味の石灰化速度 (NEC)

( $\text{mmol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) を下式で求めることができる。ATP の

主たる石灰化生物はサンゴであることから、NEC はサンゴの成長の度合いの目安となる。

$$NEC = -\frac{1}{2} \times \Delta TA / \Delta t \times \bar{Z}_t \times \rho_{\text{water}} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta TA$  は TA の変化量 ( $\text{mmol kg}^{-1}$ )、 $\Delta t$  は観測時間 (hour)、 $\bar{Z}_t$  は調査地点の観測時間  $t$  における平均水深 (m)、 $\rho_{\text{water}}$  は海水の密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ ) である。この式は海水の流動に伴う移流や拡散の効果を考慮していないが、本調査では ATP が周辺海水より隔離され、タイドプール外の海水との交換が無視できる干潮時に適用した。

TA の時間変化から石灰化速度を求める手法はサンゴ礁海域に広く適用されている (例えば Hata et al., 2002; McMahon et al., 2013)。TA の時間変化の回帰直線の傾きから、NEC を求めた。

浦添第一防波堤の ATP において 2019 年 7–11 月にかけて、タイドプールが干出する 3–4 時間に 10–12 分間隔で採水と、採水期間中の水温、塩分、光量子、水位の観測を行った。昼間の採水を 2019 年 7 月 2 日、7 月 31 日、8 月 1 日、8 月 29 日、8 月 30 日、9 月 28 日の計 6 回、夜間の採水を 2019 年 11 月 13–14 日、11 月 17 日の計 2 回行った。採水は ATP の St.1-3 (天端高 LWL+1.0 m, FRP グレーチング加工区)、St.2-3 (天端高 LWL+1.0 m, 10mm 凹凸加工区)、St.3-3 (天端高 LWL+1.0 m, 無加工区)、St.4-3 (天端高 LWL+0.7 m, FRP グレーチング加工区)、St.5-3 (天端高 LWL+0.7 m, 10mm 凹凸加工区)、St.6-3 (天端高 LWL+0.7 m, 無加工区) の計 6 地点で行った。ATP 内の水塊の炭酸系の比較基準とするため、ATP から 1 km 程度離れた外洋の表層水も採取した。各地点では表層海水をバケツで汲み、250 mL の Schott Duran 瓶に採取し、200  $\mu\text{L}$  の飽和塩化第二水銀溶液を添加して溶存無機炭素を固定した。海水試料は Gran plot 法により、全アルカリ度 (TA) を測定した。Gran plot 法による測定には全アルカリ度滴定装置 (ATT05 および ATT15, Kimoto Electric Co., Ltd., Osaka, Japan) を使用し、全炭酸標準物質 (KANSO Co., Ltd., Osaka, Japan および Scripps 研究所から提供された炭酸系の標準溶液) を用いて精度の確認を行った。TA の繰り返し精度は 3  $\mu\text{mol kg}^{-1}$  以下であった。NEC は、連続する 3 回の採水 (30–40 分間) ごとと、各採水日の昼間、夜間のタイドプールが閉鎖する 3–4 時間の平均的な NEC を求めた。

#### (5) ATP 各壁面の光量子測定

ATP の底面と 4 つの側面 (岸側面、沖側面、右側面、

左側面)で光量子を測定し、各壁面の光量子とサンゴ被度の関係を調べた。調査地点は ATP 天端高+0.7 m の St.4-3 とし、日射量が最も高くなる 7 月頃と最も低くなる 12 月頃を狙って各 2 週間程度観測を行った。観測期間は 2019 年 7 月 17 日～8 月 3 日と 2019 年 12 月 11 日～12 月 24 日である。各側面においては中央部に光量子計を設置し、底面においては吊鉄筋に光量子計を設置した。光量子計は各側面の中央部にサンゴを避けて可能な限り高さを揃えて設置した。底面からの設置高さは底面では 127 mm、岸側面では 142 mm、沖側面では 127 mm、右側面では 137 mm、左側面では 125 mm である。

## 2.5 防波堤の費用対サンゴ着生効果の試算

### (1) 試算対象とした防波堤断面とサンゴ面積の試算範囲

浦添第一防波堤におけるサンゴ分布調査結果に基づき、生物共生型断面 (Pro-environment breakwater (PB)) とその比較対象区間として通常断面 (Control) の延長 1 m あたりのサンゴ着生面積を試算した。ATP の設置水深が浅い生物共生型断面を PB<sub>shallow</sub>、ATP の設置水深が深い生物共生型断面を PB<sub>deep</sub> とする。PB<sub>shallow</sub> では、ATP の天端高が LWL +1.0m、嵩上げマウンドの天端高が LWL -7m、直立部の凹凸加工パネルの設置水深は LWL -3.5～-6.0 m である。PB<sub>deep</sub> では、ATP の天端高が LWL +0.7m、嵩上げマウンドの天端高が LWL -5m、直立部の凹凸加工パネルの設置水深は LWL -1.6～-3.9 m である。Control, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> の断面図とサンゴ面積の試算対象とした防波堤上の範囲を図-2.11 に示す。試算の対象とした高さの範囲は、Control では一般にサンゴの生息可能高さの上端である大潮の平均的な干潮面にほぼ等しい LWL 0 m とし、下端は防波堤表面の下端である LWL -20 m とした。PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> ではこれらの範囲に加えて、ATP の底面、側面、上面も試算対象に含めた。防波堤の消波ブロック、被覆ブロック、ATP、ケーソン本体 (主に直立壁面)、根固方塊の各部位ごとにサンゴ面積を試算した。ATP のサンゴ面積は底面に FRP グレーチング加工が施されている場合を想定して試算した。凹凸加工の効果は幅 10 mm の場合を試算した。PB<sub>deep</sub> の港内側に設置されている凹凸加工被覆ブロックと、PB<sub>shallow</sub> 及び PB<sub>deep</sub> の港内側に設置されている凹凸加工根固方塊は、加工区におけるサンゴの着生状況がモニタリングされていないため、凹凸加工によるサンゴの着生効果及び凹凸加工にかかるコストの試算の対象外とした。以下に防波堤の各部位のサンゴ面積試算方法の詳細を示す。

### (2) ATP のサンゴ面積の試算方法

底面の中央部に FRP グレーチング加工を施した ATP をサンゴ面積の試算対象とした。ATP の壁面 (底面、側面、上面) に分布するサンゴの面積を合計し、ATP の各柵のサンゴ面積を求めた。ケーソン 1 函あたり 4 柵の ATP のサンゴ面積の合計値をケーソンの長さ 20 m で除して延長 1 m あたりのサンゴ面積を求めた。サンゴ面積を壁面面積で除して ATP のサンゴ被度を求めた。調査時の施工後経過年数は ATP 天端高 LWL +1.0 m の FRP グレーチング加工区が 4 年、LWL +0.7 m の FRP グレーチング加工区が 5 年で、前者が後者の 10 ヶ月後に施工されたため、施工年月の違いがサンゴ面積に影響している可能性がある。

### (3) 港内側直立壁面、ケーソン本体、根固方塊、被覆ブロックのサンゴ面積の試算方法

浦添第一防波堤の直立壁面における水深とサンゴ被度の関係に基づきサンゴ面積を推定した。通常断面については、通常断面の無加工の直立壁面の各水深のサンゴ被度の平均値を用いて水深区間 1 m ごとのサンゴ面積を求めた。生物共生型断面においては、生物共生型断面の各水深のサンゴ被度の平均値を用いて水深区間 1 m ごとのサンゴ面積を求めた。無加工区においては、各水深帯の無加工区のサンゴ被度の平均値を用い、凹凸加工区においては、各水深帯の凹凸加工区のサンゴ被度の平均値を用いた。根固方塊、被覆ブロックのサンゴ被度は、通常断面の無加工の直立壁面のサンゴ被度の平均値と同じとして試算した。通常断面、生物共生断面ともに LWL -7 m より深い直立壁面、ケーソン本体、根固方塊、被覆ブロックのサンゴ被度は、LWL -7 m の無加工の直立壁面のサンゴ被度の平均値と同じとして試算した。直立壁面、被覆ブロック、根固方塊の表面積は断面図の勾配と延長方向、直交方向の長さから防波堤の上面面積として求めた。

### (4) 港外側消波ブロック・被覆ブロックのサンゴ面積の試算方法

浦添第一防波堤港外側の消波ブロックの水深とサンゴ被度の関係を用いて、各水深のサンゴ被度の平均値から水深区間 1 m ごとのサンゴ面積を求めた。

通常断面については、消波ブロックは全て無加工とし、無加工の消波ブロックの LWL -1～-12 m の水深とサンゴ被度の関係を用いてサンゴ面積を試算した。サンゴ被度のデータが無い水深においては、対象水深の上下の水深の平均値を内挿して求めた。LWL 0～-1 m のサンゴ被度は、LWL -1 m のサンゴ被度の平均値を用いた。LWL -12 m より深くに位置する消波ブロックのサンゴ被度は、

LWL-12 m の消波ブロックのサンゴ被度と同じ値を用いて試算した。LWL-18.26 m 以深に分布する港外側の被覆ブロックではサンゴ分布調査が行われていないため、LWL-12 m の消波ブロックのサンゴ被度を同じ値を用いて試算した。

生物共生型断面では LWL0~-12 m の表層第 1 層に凹凸加工消波ブロックが分布するものとして試算した。LWL0~-12 m の凹凸加工消波ブロックのサンゴ面積 ( $A$ ) は、通常断面の無加工の消波ブロックの水深とサンゴ被度の関係をベースに、加工区による被度の上昇分を上積みしてサンゴ面積を求めた。

$$A_{coral} = A_{block\ processed} \times \%C_{processed} + (A_{block\ total} - A_{block\ processed}) \times \%C_{unprocessed} \quad (1)$$

$A_{coral}$  は水深区間 1 m, 延長 1m あたりの凹凸加工ブロックのサンゴ面積,  $A_{block\ processed}$  は水深区間 1 m, 延長 1m あたりの消波ブロックの加工区的面積,  $\%C_{processed}$  は生物共生型防波堤の消波ブロック加工区の各水深のサンゴ被度の平均値,  $A_{block\ total}$  は水深区間 1 m, 延長 1m あたりの消波ブロックの表面積,  $\%C_{unprocessed}$  は通常断面の無加工消波ブロックの各水深のサンゴ被度の平均値である。 $A_{block\ total}$  は、断面図の勾配と延長方向、直交方向の長さから求めた上面面積に、消波ブロックの凹凸を考慮するため、天然のサンゴ礁地形の地盤の凹凸度（インド太平洋地域のサンゴ礁の平均値 1.40, Graham and Nash, 2013）をかけて求めた。 $A_{block\ processed}$  は、簡易的な防波堤断面模型を用いたブロック模型の据付により延長 1m 水深区間 1m あたり表面に露出するブロック個数 (0.0729 個) を求め、消波ブロック 1 個あたりの加工区面積 (1.256 m<sup>2</sup>) を掛け合わせて求めた。 $\%C_{processed}$  は、 $\%C_{unprocessed}$  に LWL0~-6 m に存在する 10 mm 凹凸加工消波ブロックの無加工区のサンゴ被度の平均値に対するの加工区のサンゴ被度の平均値の比 (2.40) を掛け合わせて求めた。凹凸加工消波ブロックでは、凹凸加工が施されている面が全て表面に露出していると仮定して試算した。LWL-12 m 以深の無加工の消波ブロック、被覆ブロックのサンゴ面積は通常断面と同様に計算した。

#### (5) コスト、費用対効果の算出

3 つの防波堤断面 Control, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> について、防波堤の延長方向 1 m あたりの概算工事費を試算した。概算工事費は防波堤の主要な工種ごとに必要な石材やブロックなどのコストと、それらの製作、積み込み、据付など一連の工事にかかる費用を算出・計上した。生物共生型断面 PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> では凹凸加工などの生物共生部材の費

用も計上した。概算工事費を防波堤の造成にかかるコストとし、延長方向 1 m あたりに着生するサンゴ面積を延長方向 1 m あたりのコストで割って各断面の費用対効果を求めた。基礎捨石は 2019 年度単価を用いた。

表-2.1 那覇港におけるサンゴに関する調査報告書一覧

[illegible]

|           |    |
|-----------|----|
| 那霸全冊數     | 53 |
| 那霸採用冊數    | 27 |
| 那霸人工構造物冊數 | 26 |
| 那霸天然礫冊數   | 21 |

表-2.2.2 那覇港におけるサンゴに関する調査項目一覧

[illegible]

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| × | 水深の基準値が不明確（調査時の実水深のみで、現況調査以外） |
| ○ | ローデータなし（編集データあり、現況調査以外）       |
| × | ローデータなし（編集データあり、現況調査以外）       |
| × | ローデータなし（編集データあり、現況調査以外）       |
| ○ | 天然礁データあり（継続）                  |
| ◎ | 人工構造物データあり（継続）                |
| ◎ | 天然礁、人工構造物データともにあり（継続）         |
| ● | データを採用した報告書                   |

表-2.3 整理したデータ項目

| 項目                 | 内容                                                | 摘要 (条件)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 調査の基本情報        | 調査年, 地点名, 施工年度, 施工後<br>経過年数, 位置情報, 調査方法, 観<br>察面積 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| (2) サンゴの生物量と<br>種類 | 総被度, 種類別・群体形別被度, 種<br>類別・群体形別群体数, 群体の長さ           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・サンゴの種類は典型的かつ出現頻度が高い, ハナヤサイサンゴ属, コモンサンゴ属, ミドリイシ属, ハマサンゴ属, キクメイシ科, アナサンゴモドキ属, その他とした. キクメイシ科 (Faviidae) は, 西平・Veron (1995) に基づく分類で, 現在は分類体系が変更されサザナミサンゴ科 (Merulinidae) に吸収されているが, 本稿では過去の調査との整合性を保つためにキクメイシ科 (Faviidae) と表記する.</li> <li>・サンゴの群体形は典型的な樹枝状 (枝状), 卓状, 塊状, 準塊状, 散房花状, 指状, 被覆状, 葉状, 板状, その他とした.</li> <li>・群体の長さは, 長径, 最大径を整理した.</li> <li>・ソフトコーラルは, 総被度と総群体数を整理した.</li> </ul>                               |
| (3) サンゴ周辺の環境       | 地形, 水深, 基盤傾度, 表面加工,<br>水温, 透明度, 方位, 浮泥の堆積状<br>況   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・地形は, 人工構造物では直立壁面, 消波ブロック, 根固ブロック, 被覆ブロック等の防波堤の部位を整理した. 天然礁では天然のサンゴ礁の地形区分 (礁池, 礁嶺, 礁原, 礁斜面) を整理した.</li> <li>・水深は, 朔望平均干潮面 (Low Water Level (LWL)) を基準として整理した.</li> <li>・基盤傾度は, 基盤の傾きを整理した.</li> <li>・表面加工は, 表面加工の状況を整理した.</li> <li>・水温, 透明度については, 継続的に計測されている公共用水域データから整理した.</li> <li>・方位は, 上面から見た場合にサンゴの生育する基盤面が海域に面する方角を 8 方位で整理した. 根固ブロックなどのフラットな面は flat と表現した.</li> <li>・浮泥の堆積状況は, 定性的な 4 段階のデータを整理した.</li> </ul> |
| (4) サンゴの健全度        | 食害生物数, 白化の状況, 稚サンゴ<br>の量 (段階)                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・食害生物数は, オニヒトデの個体数およびシロレイシガイダマシ類の発生階級を 4 段階で整理した.</li> <li>・白化の状況は, 白化の段階を 5 段階で整理した.</li> <li>・稚サンゴの量は, サンゴの加入度を 3 段階で整理した.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                               |

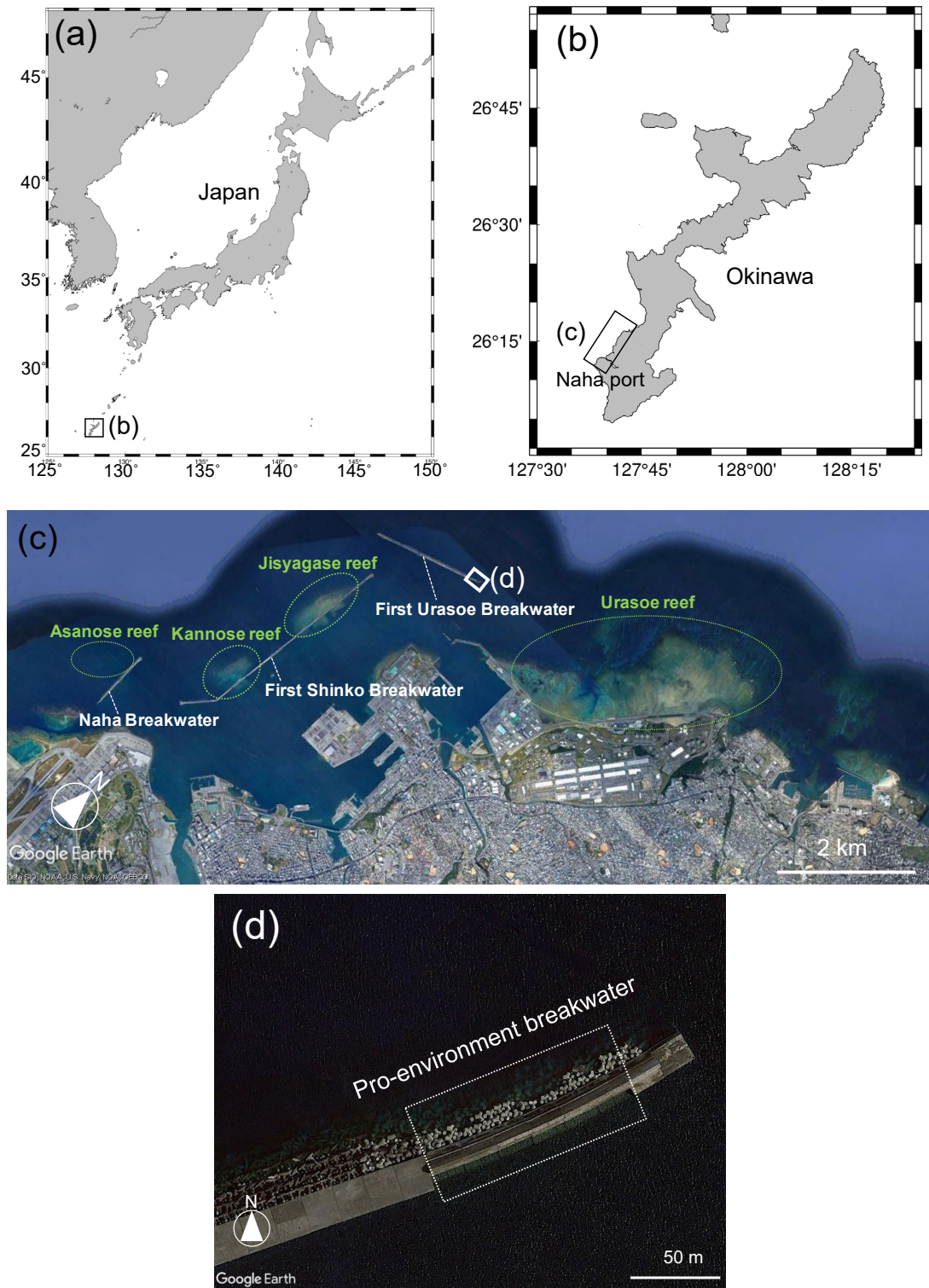


図-2.1 調査地域（那覇港）

(a, b) 那覇港, (c) 那覇港内の主要な防波堤（那覇防波堤, 新港第一防波堤, 浦添第一防波堤）と天然礁（浅ノ瀬, 干ノ瀬, 自謝加瀬, 浦添天然礁）, (d) 浦添第一防波堤の生物共生型防波堤の整備区間の位置を示す.

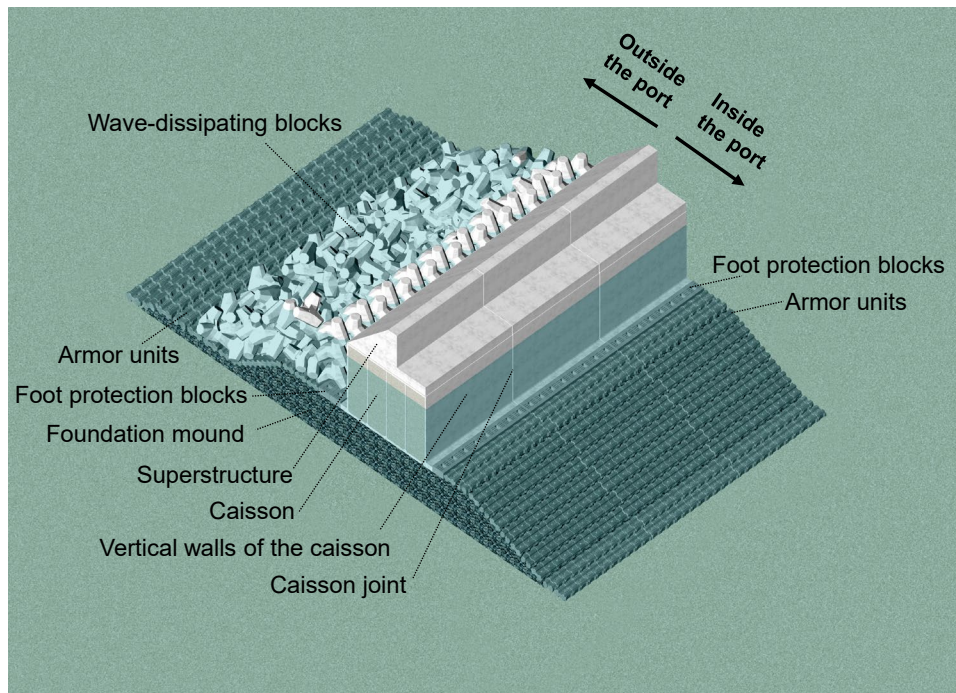


図-2.2 通常の防波堤（上部斜面堤）のアイソメトリック図

延長方向長さ 20 m のケーソン 3 函，LWL +12.30～-21.80 m の区間を示す。ラベルは部材・部位の名称を表す。

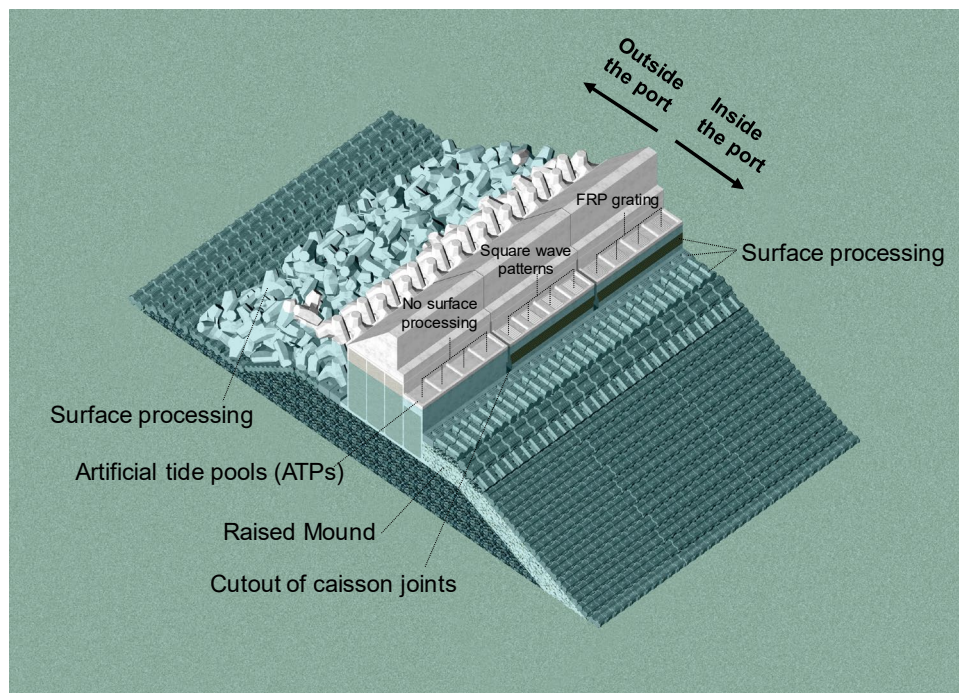


図-2.3 生物共生型防波堤のアイソメトリック図

延長方向長さ 20 m のケーソン 3 函分，LWL +12.30～-21.80 m の区間を示す。生物共生部材をラベルで示した。生物共生部材として人工タイドプール（ATP）、嵩上げマウンド、通水型ケーソン、凹凸加工消波ブロック、直立部の凹凸加工プレート、凹凸加工被覆ブロック、凹凸加工根固方塊が設置されている。ATP の底面は手前から奥のケーソンに向かって無加工区、凹凸加工区、FRP グレーチング加工区になっている。

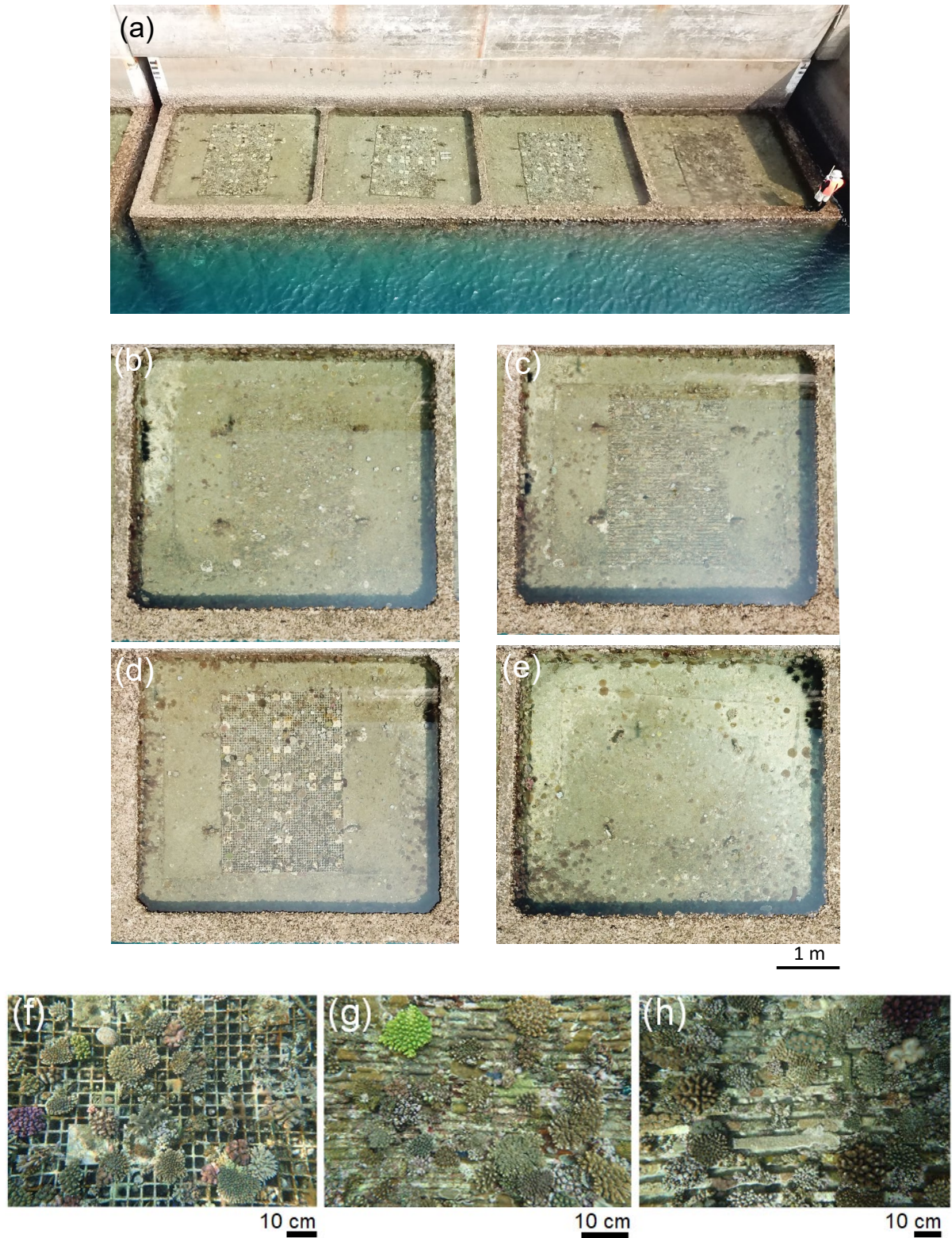


図-2.4 人工タイドプール (ATP) の写真

(a) ATP の天端高 LWL +1.0 m の FRP グレーチング加工区. 干潮時には ATP の縁が干出してタイドプールとなる.  
(b) ~ (e) ATP 底面の写真. それぞれ (b) 10 mm 凹凸加工区, (c) 30 mm 凹凸加工区, (d) FRP グレーチング加工区, (e) 無加工区を示す. (f) ~ (h) ATP 底面の加工の拡大写真. それぞれ (f) FRP グレーチング, (g) 10 mm 凹凸加工, (h) 30 mm 凹凸加工を示す.

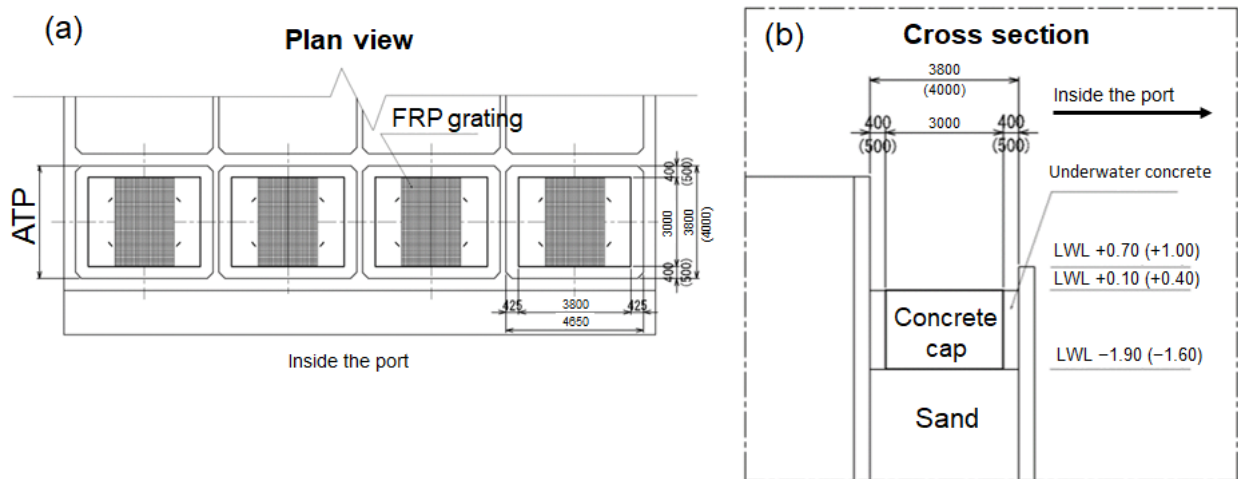


図-2.5 人工タイドプール（ATP）の図面

(a) 平面図と (b) 断面図を表す。寸法の単位は mm である。設置高さは LWL を基準とした表記とし、単位は m である。平面図は FRP グレーチング加工区を示す。カッコ外とカッコ内の数字は、それぞれ  $PB_{\text{deep}}$  と  $PB_{\text{shallow}}$  の寸法値と設置高さを表す。断面図は柵の深さが 60 cm の図面を示す。

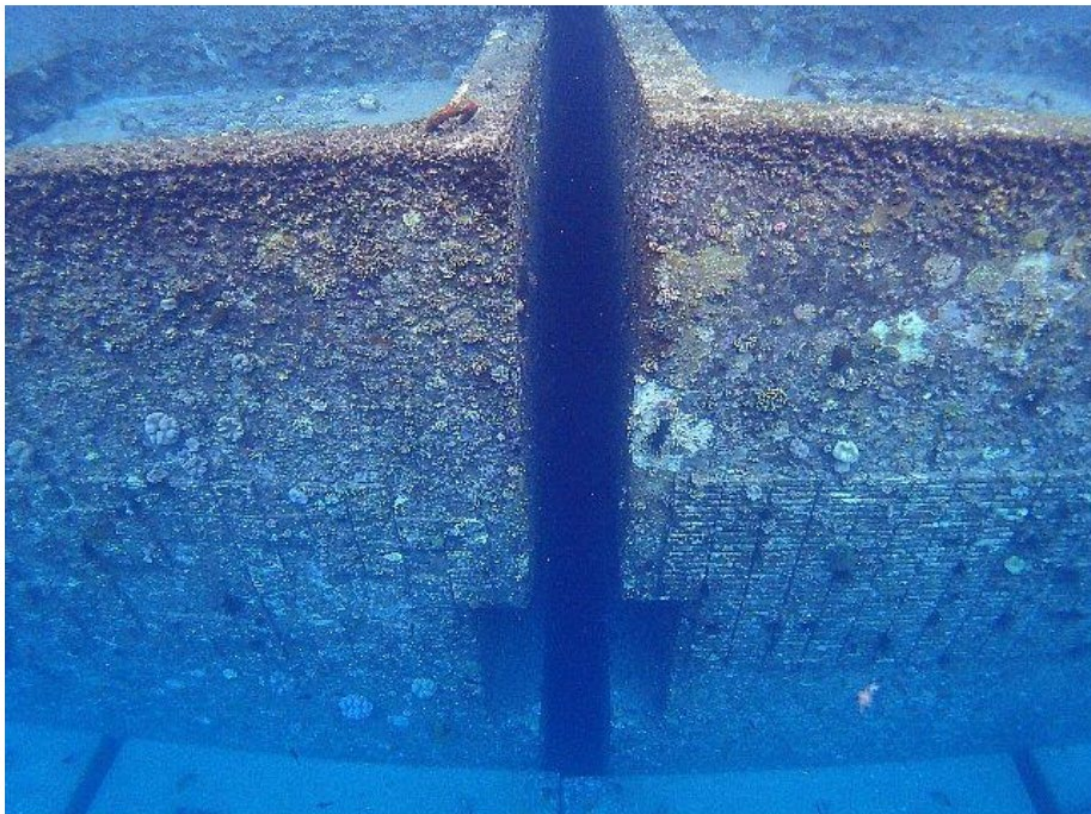


図-2.6 通水型ケーソンの目地部

写真の目地部ではケーソン上部の目地幅が 73 cm、通水部の目地幅が 173 cm となっている。

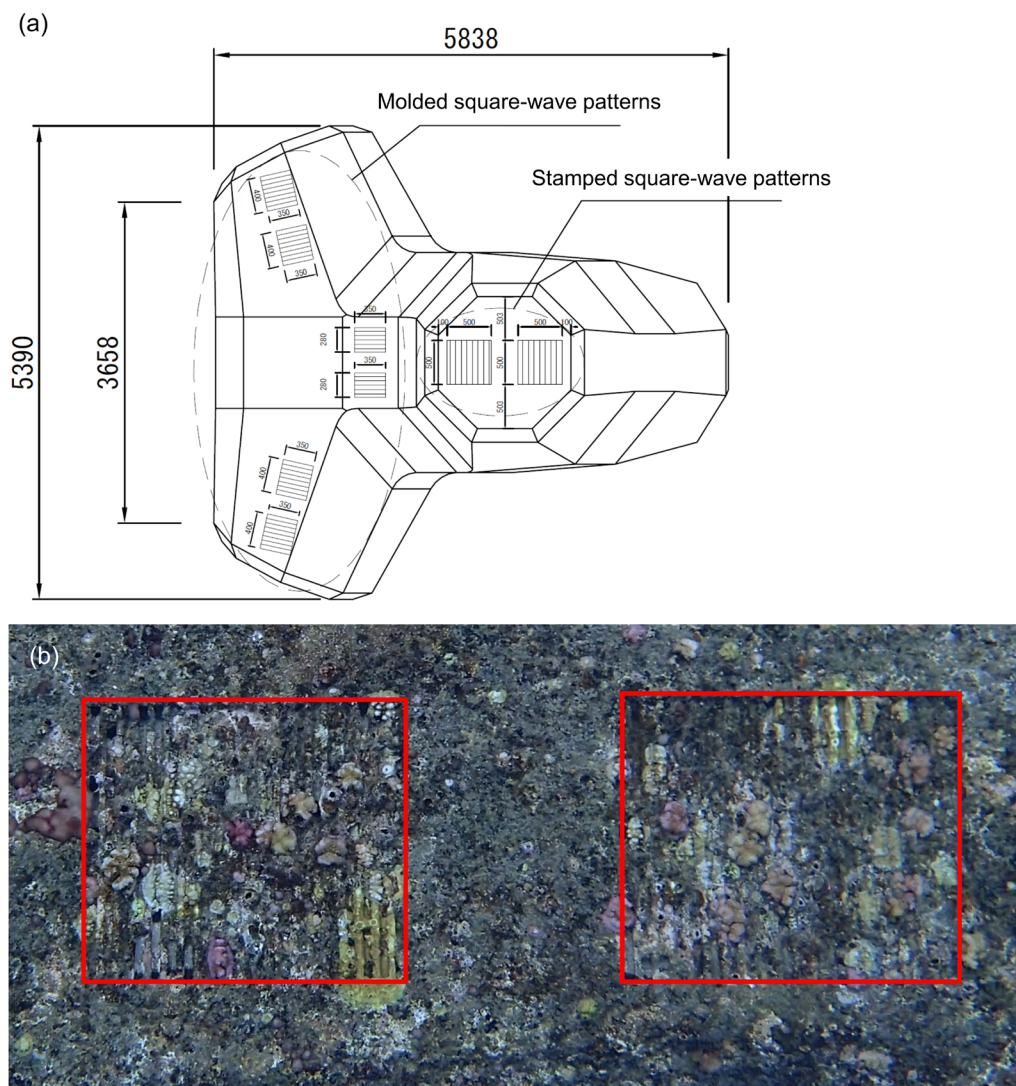


図-2.7 凹凸加工消波ブロック

(a)凹凸加工消波ブロックの平面図。寸法の単位は mm。 (b) 凹凸加工消波ブロックの 10 mm 凹凸加工区（赤枠で囲われた部分）。凹凸加工区の寸法は約 350 mm × 400 mm。

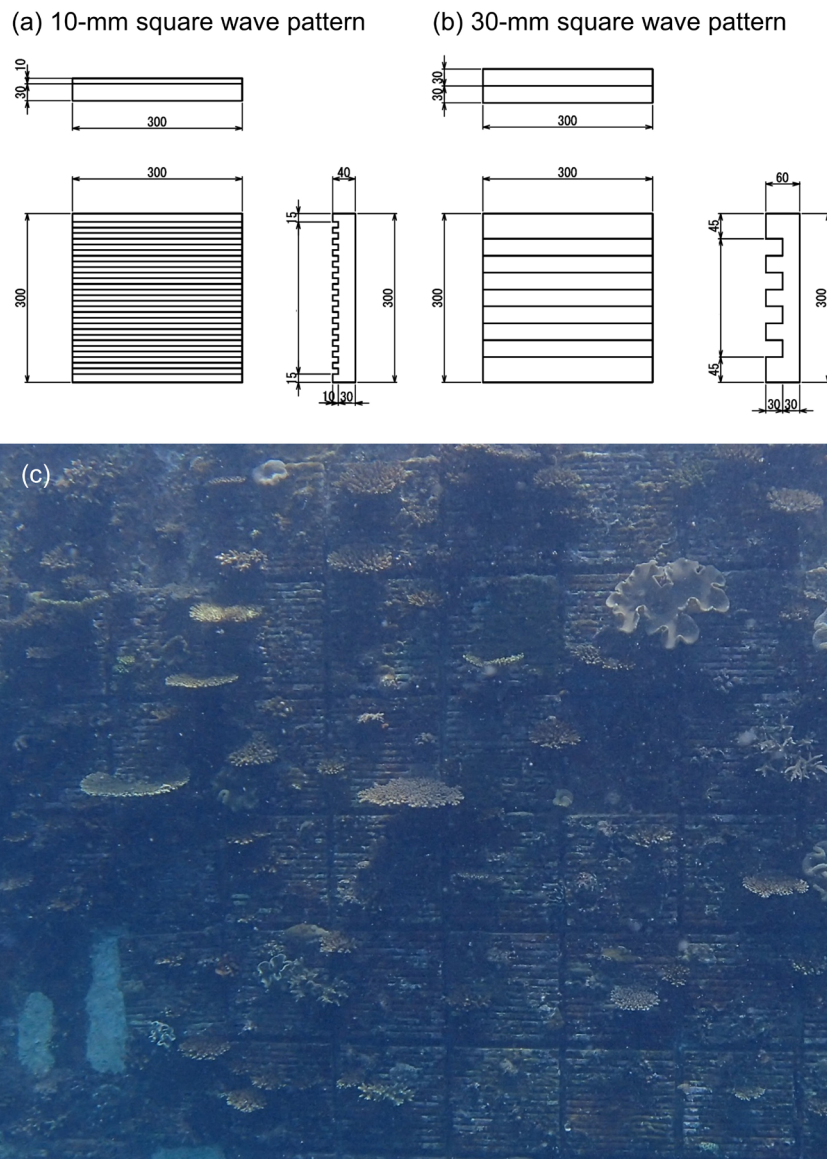


図-2.8 凹凸加工モルタルプレート

(a) 10 mm 凹凸加工プレートと (b) 30 mm 凹凸加工プレートの平面図と断面図を示す。寸法の単位は mm. (c) ケーソンの直立壁面に貼付された 10 mm 凹凸加工プレート。

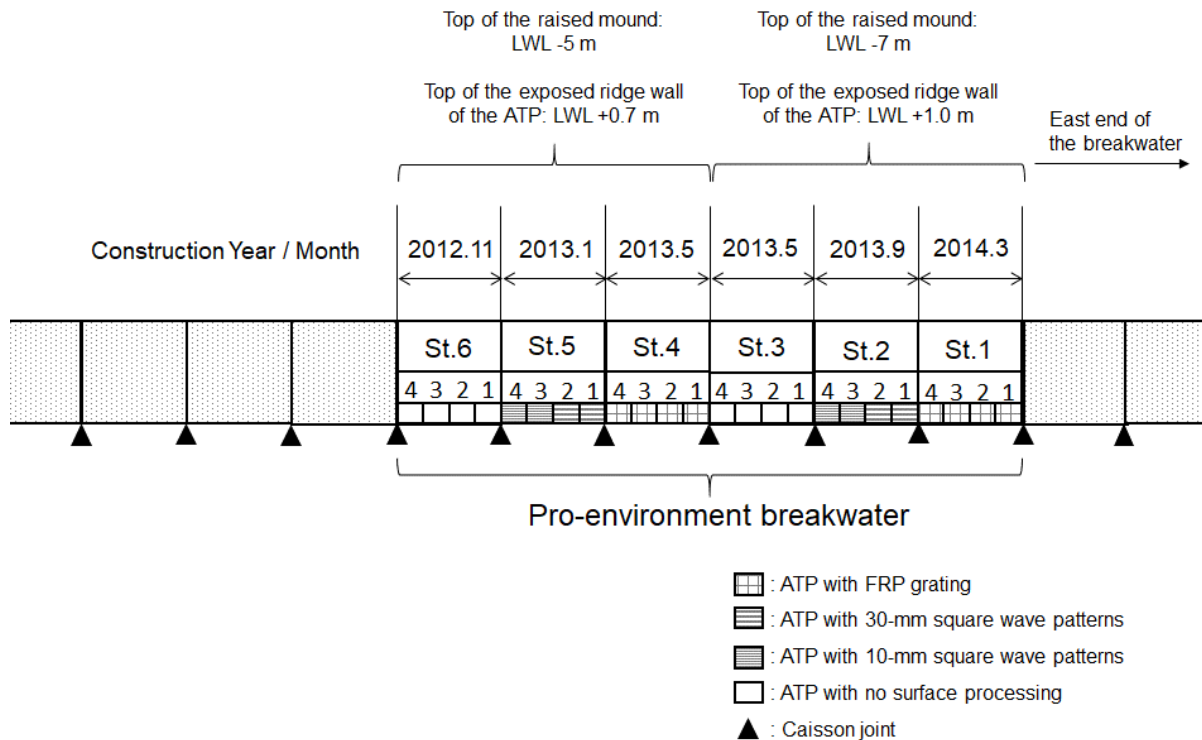


図-2.9 浦添第一防波堤の生物共生型防波堤の施工状況と各ケーソン，ATP の名称

生物共生型防波堤は幅 20 m の通水型ケーソン 6 函分整備されている。生物共生型整備区間の東端のケーソンから順に St.1, St.2, St.3, St.5, St.5, St.6 とする。ATP の各柵の名称は各ケーソンの東端の柵から順に 1～4 の番号を振り，St. 名の後ろにハイフンと柵の番号をつけて表す。（例：St.1 の東端の ATP の柵の名称は St.1-1.）ATP の格子模様は FRP グレーチング加工区，太い横線は 30-mm 凹凸加工区，細い横線は 10-mm 凹凸加工区，無地は無加工区を表す。黒三角はケーソンの目地を表す。

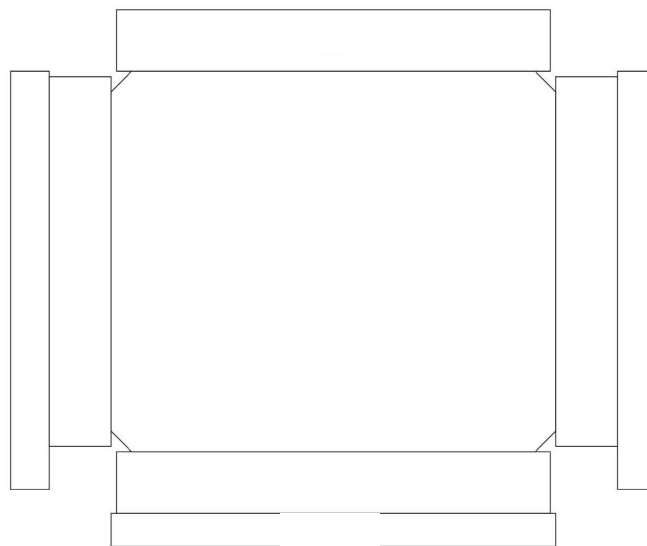


図-2.10 ATP の展開模式図と各壁面の名称

底面に接する内壁面を側面，ATP の縁の頂部を上面とする。港内側の側面（上面）を岸側面（岸上面），港外側の側面を沖側面，港外側に向かって右側（東側）の側面（上面）を右側面（右上面），港外側に向かって左側（西側）の側面（上面）を左側面（左上面）とする。

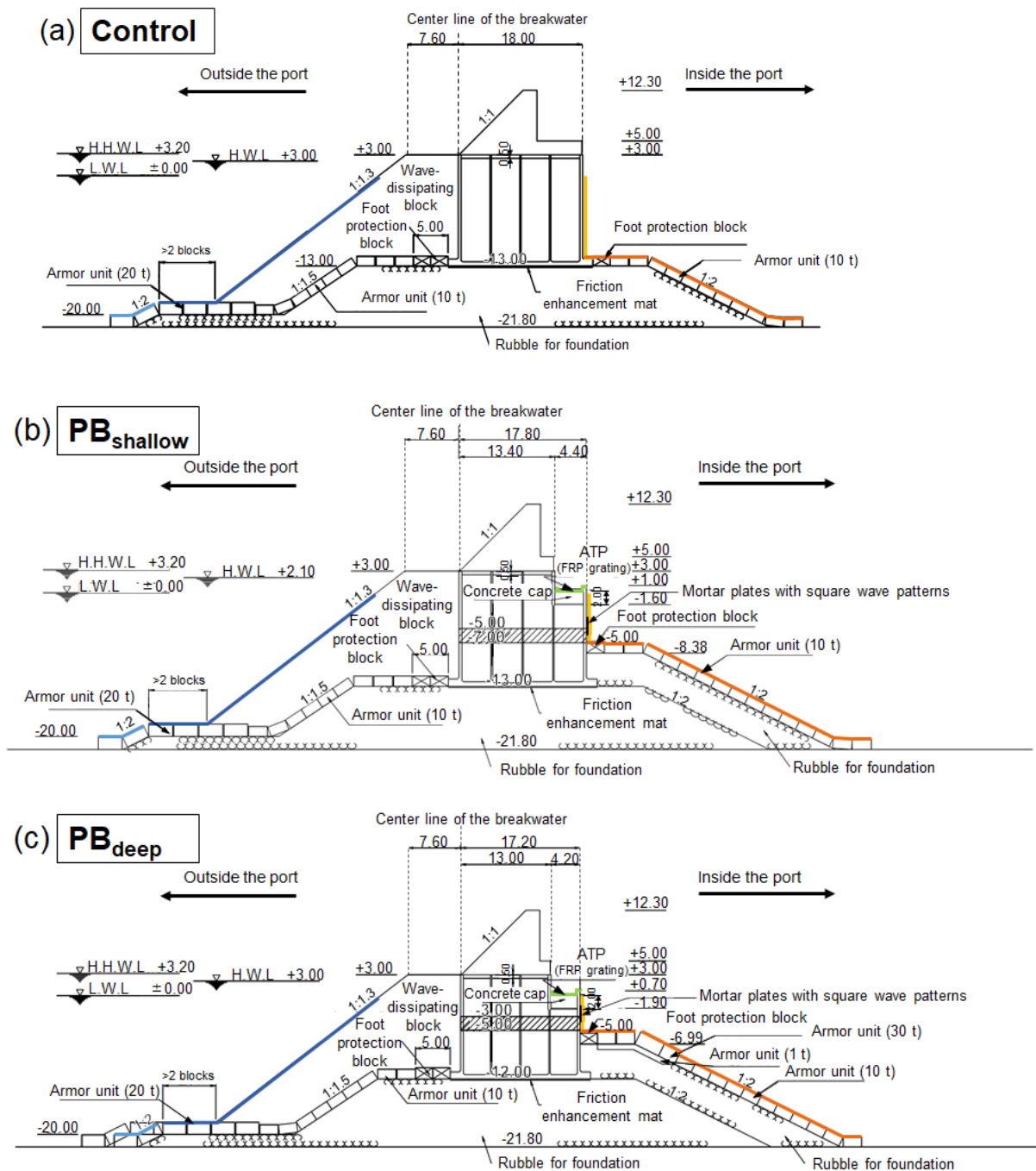


図-2.11 通常防波堤（Control）と生物共生型防波堤（PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub>）の断面図とサンゴ面積の試算対象とした防波堤堤上の範囲

寸法と水深の単位はm, カッコ内の数値は重量（トン）を表す. PB<sub>shallow</sub> はPB<sub>deep</sub> よりも ATP の設置水深が浅い. PB<sub>shallow</sub> は, ATP の天端高が L.W.L. +1.0m, 嵩上げマウンドの天端高が L.W.L. -7m, 直立部の凹凸加工パネルの設置水深は L.W.L. -3.5~-6.0 m である. PB<sub>deep</sub> は, ATP の天端高が L.W.L. +0.7 m, 嵩上げマウンドの天端高が L.W.L. -5m, 直立部の凹凸加工パネルの設置水深は L.W.L. -1.6~-3.9 m である. 色のついた線はサンゴ面積の算出対象とした防波堤表面を表す. 青色は消波ブロック, 水色は港外側の被覆ブロック, オレンジ色は港内側の被覆ブロック等（被覆ブロック, 根固方塊, 直立壁面以外のケーソン本体）, 黄色はケーソンの直立壁面, 黄緑色は ATP の対象範囲をそれぞれ表す.

### 3. 結果

#### 3.1 防波堤の環境条件とサンゴの着生状況

##### (1) 水深とサンゴ被度の関係

図-3.1 に那覇港防波堤の港外側、港内側の水深とサンゴ総被度の関係を示す。港外側の総データ数は 2362、港内側の総データ数は 884 となった。港外側は LWL-3.5～-0.5m でサンゴ総被度の中央値が 20%以上となった。港外側では LWL-7.0～-8.0 m でもサンゴ総被度が 20%以上となったが、それより深い場所では被度の中央値が 10%以下であった。港内側では LWL-0.5～0 m でサンゴ総被度の中央値がおよそ 20%と最も高く、水深が深くなるに従ってサンゴ被度が低くなった。

##### (2) 基盤傾度とサンゴ被度の関係

図-3.2 に那覇港防波堤の基盤傾度とサンゴ総被度の関係を示す。基盤傾度 0°は水平面上にサンゴが分布している状態を表し、基盤傾度 90°は垂直面上にサンゴが分布している状態を表す。総データ数は 2852 となった。基盤傾度 15～45°の範囲でサンゴ被度の中央値が概ね 20%以上となった。

##### (3) ATP の各壁面の光量とサンゴ被度の関係

図-3.3 に ATP (FRP グレーチング加工区 St.4-3) のサンゴのマッピング図を示す。St.4-3 では、沖側面でサンゴ総被度が 56.82%と最も高く、次いで被度が高い順に左側面 28.16%、右側面 25.17%、岸側面 6.63%、底面（無加工部）6.52%となった。図-3.4 に ATP (FRP グレーチング加工区 St.4-3) の各壁面の光量子の観測結果を表す。1 時間平均光量子を見ると、東に面する左側面は朝方に光があたり、西に面する右側面は昼～夕方にかけて光が当たっていた。日平均光量子を見ると、底面の光量子が最も高く、次いで南に面する沖側面がその他の側面よりも高かった。北に面する岸側面は光量子が低く、特に 12 月に他の側面よりも光量が低くなった。夏期の光量子観測結果については、底面を除く 4 つの側面について、観測期間中の日平均光量子 ( $n=18$ ) が高くなるほどサンゴ総被度が高かった ( $y=0.060x-73.84, p<0.05$ )。図-3.5 に ATP の各壁面のサンゴ総被度を示す。St.1～5 では、ATP の側面のうち沖側面で最も被度が高く、岸側面で最も被度が低くなった ( $p<0.05$ )。St.6 では全ての壁面で被度に差がなかった ( $p>0.05$ )。右側面は岸側面より被度が高く、沖側面と同等かそれより低い被度であった。左側面は右側面と同等の被度であった。全ての St.で底面の無加工部の被度は岸側面と同程度であ

った。底面加工部の被度は St.1 では沖側面と同等で、St.4 では左右の側面と同程度の被度であった。St.2 では底面加工部の被度は沖側面より低く、他の側面の被度と有意差がなかった。St.5 では底面加工部の被度のばらつきが大きく、他の壁面の被度と有意差がなかった。

##### (4) 目地からの距離とサンゴ被度の関係

図-3.6 に防波堤港内側ケーソン直立壁面における目地からの距離とサンゴ総被度の関係を示す。目地部ではサンゴ総被度の中央値が 8.3%と、目地からの距離が 5 m の地点（中央値 2.9%）、10 m の地点（ケーソン中央部、中央値 3.5%）よりもサンゴ総被度が高かった ( $p<0.001$  (0 m と 5 m),  $p<0.05$  (0 m と 10 m))。

#### 3.2 生物共生型防波堤構造の効果

##### (1) ATP のサンゴ着生状況

図-3.7 に ATP の各柵のサンゴ分布状況、図-3.8 に ATP の各 St.のサンゴ総被度と種類別被度を示す。サンゴ総被度は St.4, 5 で最も高く、St.2 で最も低かった。種類別の被度を見ると、キクメイシ科の被度は St.4 で最も高く、St.1～3 よりも ATP 天端高が深い St.4～6 で被度が高くなった。ミドリイシ属の被度は St.5 で最も高く、St.4 では St.2,3,6 よりも高くなった。

##### (2) ATP 底面のサンゴ着生状況

図-3.9 に ATP 底面の加工部と無加工部のサンゴ被度を示す。St.1, St.4, St.5 では ATP 底面のサンゴ総被度（平均値±標準偏差）が加工部でそれぞれ  $15.38\pm2.37\%$ ,  $23.33\pm3.31\%$ ,  $23.23\pm9.63\%$ 、無加工部でそれぞれ  $1.36\pm0.15\%$ ,  $7.20\pm2.58\%$ ,  $9.70\pm1.76\%$  となり、加工部で無加工部よりもサンゴ総被度が高かった ( $p<0.05$ )。St.2 のサンゴ被度（平均値±標準偏差）は加工部 ( $5.71\pm1.98\%$ ) と無加工部 ( $3.01\pm0.62\%$ ) で有意差がなかった ( $p>0.05$ )。St.1, St.4, St.5 の加工部ではミドリイシ属の比率が高かった。サンゴの種類別に見ると、ミドリイシ属、アナサンゴモドキ属、キクメイシ科、ハナヤサイサンゴ属については無加工部より加工部の被度が高くなる地点があった。ミドリイシ属は St.1, St.2, St.4, St.5 全ての地点において加工部の被度が無加工部より高かった ( $p<0.05$ )。St.5 ではハマサンゴ属の被度が加工部より無加工部で高くなったが、それ以外のケースではいずれも加工部で無加工部よりサンゴ被度が高くなった ( $p<0.05$ )。コモンサンゴ属とその他の種類のサンゴは各 St.の被度の平均値が加工部で 1%未満、無加工部で 0.1%未満となり、ともに加工部と無加工部でサンゴ被度に有意差がなかった ( $p>0.05$ )。

### (3) ATP のサンゴ礁生態系の石灰化速度

図-3.10 に ATP の昼間および夜間の生態系の正味の石灰化速度 ( $NEC$ ) を示す。ATP の設置水深ごとに比較すると、昼間の  $NEC$  は、ATP 天端高が  $LWL+1.0$  m もしくは  $LWL+0.7$  m のいずれの桁においても FRP グレーチング加工区と凹凸加工区の方が、無加工区よりも  $NEC$  が高かった。夜間の  $NEC$  は昼間の  $NEC$  より低く、ATP 天端高が  $LWL+0.7$  m の桁では FRP グレーチング加工区、凹凸加工区で無加工区よりも  $NEC$  が高かったが、ATP 天端高が  $LWL+1.0$  m の桁ではその傾向は顕著でなかった。

### (4) ATP の魚類と大型底生生物の分布状況

図-3.11 に ATP の魚類の蟄集状況の例 (St.5-1) を、図-3.12 に ATP 内で観察された魚類の種類数と個体数を示す。魚類の種類数は St.4, 5 で St.2, 3, 6 より高くなった。魚類の個体数は St.4 で最も高く、St.2, 3, 6 で最も低かった。ATP の設置水深別にみると、ATP の天端高が  $LWL+0.7$  m の場合も  $LWL+1.0$  m の場合も FRP グレーチング加工区は無加工区より魚類の種類数と個体数が多く、同じ FRP グレーチング加工区では  $LWL+0.7$  m の桁の方が  $LWL+1.0$  m の桁よりも種類数、個体数とも多かった。St.4 ではオキナワスズメダイ、ルリスズメダイ、ソラスズメダイが多く確認された。St.1, 2, 4, 5, 6 では貴重種のセアカコバンハゼ、アイココバンハゼ、イチモンジコバンハゼが確認された。

図-3.13 に ATP に分布する大型底生生物の例を、図-3.14 に ATP のシャコガイ類、ナガウニ類、ガンガゼ類、ナマコ類の個体数を示す。ATP 内では漁獲の対象となっているヒメジャコを含むシャコガイ類などが観察された。

### (5) 直立部の凹凸加工パネルのサンゴ着生状況

図-3.15 に直立部の凹凸加工パネル（設置水深  $LWL-2\sim-3$  m）のサンゴ着生状況、図-3.16 に直立部の凹凸加工パネル（設置水深  $LWL-4\sim-5$  m）のサンゴ着生状況を示す。設置水深  $LWL-2\sim-3$  m では 10 mm 凹凸加工区のサンゴ総被度が無加工区より高くなった ( $p < 0.05$ )。サンゴの種類別に見ると 10 mm 凹凸加工区においてはコモンサンゴ属の被度が 30 mm 凹凸加工区や無加工区よりも高かった。一方ハマサンゴ属の被度が 30 mm 凹凸加工区や無加工区よりも低かった。設置水深  $LWL-4\sim-5$  m では 30 mm, 10 mm 凹凸加工パネルのサンゴ総被度が無加工区より低くなった ( $p < 0.05$ )。無加工区においてはハマサンゴ属やキクメイシ科の被度が加工区よりも無加工区で高かった。コモンサンゴ属やミドリ

イシ属は 10 mm 凹凸加工区で無加工区よりも被度が高かった。

### (6) 凹凸加工消波ブロックのサンゴ着生状況

図-3.17 に浦添第一防波堤の凹凸加工消波ブロックの凹凸加工区と無加工区のサンゴ被度を示す。10-mm 凹凸加工区、30-mm 凹凸加工区ともに、隣接する無加工区よりもサンゴ総被度が高かった ( $p < 0.05$ )。

図-3.18 に那覇防波堤の凹凸加工消波ブロックの無加工区と凹凸加工区のサンゴ被度の経年変化を示す。ここでの凹凸加工の種類は 2 mm, 5 mm, 10 mm 幅の凹凸加工で、那覇防波堤の施工年度 1999 年の港外側消波ブロックにおけるデータである。施工後経過年数 6 年のサンゴの総被度の平均値は凹凸加工区で約 45%、無加工区で約 20% となり、凹凸加工区で無加工区の 2 倍以上の被度となった。施工後経過年数 1 年のサンゴの総被度の平均値は凹凸加工区、無加工区とも約 30% と同程度になり、消波ブロックの凹凸加工区では施工後数年間のサンゴ被度の増加率が大きかった。

### (7) 目地幅とサンゴ被度の関係

図-3.19 に浦添第一防波堤の目地幅とサンゴ被度の関係を示す。目地幅が 50 cm 以上の結果は通水型ケーソンの目地の結果である。サンゴ総被度を目地幅の一般化線形モデル（リンク関数は恒等関数、誤差構造は Gamma 分布）に当てはめると、サンゴ総被度と目地幅の関係は上に突の放物線になり、目地幅が  $89 \pm 47$  cm（モデル推定値の平均値  $\pm$  標準偏差）のときサンゴ総被度が最大となった。モデルのあてはまり具合を示す AIC (Akaike Information Criterion) は 869.02 であった。

### (8) 生物共生型防波堤の費用対サンゴ着生効果

表-3.1 に通常防波堤と生物共生型防波堤の延長 1 m あたりの表面積、サンゴ総被度、サンゴ面積、整備費用、費用対サンゴ着生効果（サンゴ面積/整備費用）の試算結果を示す。防波堤の延長 1 m あたりのサンゴ面積は、Control で  $10.15 \text{ m}^2$ 、PB<sub>shallow</sub> で  $11.53 \text{ m}^2$ 、PB<sub>deep</sub> で  $12.41 \text{ m}^2$  となり、生物共生型防波堤 PB<sub>shallow</sub>、PB<sub>deep</sub> では通常防波堤 Control と比べてサンゴ面積がそれぞれ 1.14, 1.22 倍増加した。これは PB<sub>shallow</sub> と PB<sub>deep</sub> が Control と比較して、防波堤の表面積がそれぞれ 1.11, 1.13 倍、防波堤全体のサンゴ総被度がそれぞれ 1.02 倍、1.08 倍となったことによるものである。

防波堤の整備費用は、Control, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> でそれぞれ 25,406 千円、27,632 千円、28,016 千円となった。Control

と比較して PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> の整備費用はそれぞれ 1.09 倍, 1.10 倍となった (表-3.1)。

防波堤の費用対サンゴ着生効果 (サンゴ面積/整備費用) は, Control, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> でそれぞれ 4.00, 4.17, 4.43 cm<sup>2</sup>/1,000 円となり, 生物共生型防波堤は通常防波堤に比べて費用対効果が高まった (表-3.1)。Control と比較して PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> の費用対サンゴ着生効果はそれぞれ 1.04 倍, 1.11 倍となり, PB<sub>deep</sub> の費用対サンゴ着生効果が最も高くなった。

各防波堤のサンゴ面積の内訳を見ると, 防波堤延長 1 m あたりの Control, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> のサンゴ面積は, 港外側でそれぞれ 8.84 m<sup>2</sup>, 9.23 m<sup>2</sup>, 9.23 m<sup>2</sup> となり, 港内側でそれぞれ 1.31 m<sup>2</sup>, 2.30 m<sup>2</sup>, 3.18 m<sup>2</sup> となり, 生物共生型防波堤では港外側で 0.39 m<sup>2</sup>, 港内側で 0.99~1.87 m<sup>2</sup> サンゴ面積が増加した (図-3.20)。Control の各部位のサンゴ面積は, 消波ブロックで 7.86 m<sup>2</sup>, 港外側被覆ブロックで 0.98 m<sup>2</sup>, 直立壁面で 0.61 m<sup>2</sup>, 港内側被覆ブロック他 (ケーソン本体, 根固方塊, 被覆ブロック) で 0.70 m<sup>2</sup> であった。PB<sub>shallow</sub> の各部位のサンゴ面積は, 消波ブロックで 8.25 m<sup>2</sup>, 港外側被覆ブロックで 0.98 m<sup>2</sup>, ATP で 0.35 m<sup>2</sup>, 直立壁面で 1.04 m<sup>2</sup>, 港内側被覆ブロック他で 0.91 m<sup>2</sup> であった。Control と比べて港外側消波ブロックで 0.39 m<sup>2</sup>, ATP で 0.35 m<sup>2</sup>, 直立壁面で 0.43 m<sup>2</sup>, 港内側被覆ブロック他で 0.21 m<sup>2</sup> サンゴ面積が増加した。PB<sub>deep</sub> の各部位のサンゴ面積は, 消波ブロックで 8.25 m<sup>2</sup>, 港外側被覆ブロックで 0.98 m<sup>2</sup>, ATP で 0.95 m<sup>2</sup>, 直立壁面で 1.05 m<sup>2</sup>, 港内側被覆ブロック他で 1.18 m<sup>2</sup> であった。Control と比べて港外側消波ブロックで 0.39 m<sup>2</sup>, ATP で 0.95 m<sup>2</sup>, 直立壁面で 0.44 m<sup>2</sup>, 港内側被覆ブロック他で 0.48 m<sup>2</sup> サンゴ面積が増加した。PB<sub>deep</sub> では Control と比べて ATP によるサンゴ面積の増加が最も大きく, ATP によるサンゴ面積の増加がサンゴ面積増分の 42% を占めた。PB<sub>deep</sub> では PB<sub>shallow</sub> に比べて港内側の ATP と被覆ブロック他の効果が大きかった。

各防波堤の整備費用の内訳を見ると, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> では, Control と比べて防波堤の整備コストがそれぞれ 2,226 千円, 2,610 千円高くなった (表-3.2)。その内訳を見ると, 港内側の整備費用の増加が PB<sub>shallow</sub> で 2,012 千円, PB<sub>deep</sub> で 2,563 千円となっており, マウンドの嵩上げに伴うマウンドと被覆工の増加が多くを占めていた。一方で, ATP の設置にかかる費用は 383 千円とマウンドの嵩上げ費用に比べて低かった。ATP の設置に伴い, ケーソン上端の幅が狭まり結果的に上部工の体積が減少することや, 生物共生型防波堤では通常防波堤よりもケーソン幅が狭く基礎工も減少することから, 上部工, ケーソン本体及び堤体下の基礎工の整備コストの増加は, PB<sub>shallow</sub> で 86 千円であ

った。PB<sub>deep</sub> ではケーソンの据え付け水深が Control と PB<sub>shallow</sub> に比べて 1 m 浅いことからケーソンのコストがさらに下がり, Control と比較して上部工, ケーソン本体及び堤体下の基礎工の整備コストは 70 千円低下した。港外側の消波ブロックの凹凸加工に伴うコストの増加は 67 千円, 港内側のケーソン直立壁面への凹凸加工パネルの整備費用は 61 千円であった。

### 3.3 防波堤と天然礁のサンゴ着生状況の比較

#### (1) 防波堤と天然礁のサンゴの総被度の比較

那覇港の防波堤と天然礁のサンゴ総被度を比較すると, 那覇港では防波堤の総被度の中央値 10% が天然礁の総被度の中央値 5% を上回った ( $p < 0.05$ ) (図-3.21)。図-3.22 に那覇港の防波堤と天然礁のサンゴ種類別被度の総被度に占める比率を示す。サンゴの種類別被度の内訳を見ると, 那覇港の防波堤ではミドリイシ属の比率が約 50% と最も高く, 次いでハナヤサイサンゴ属が約 20%, アナサンゴモドキ属が約 10% の比率を占めていた。那覇港の天然礁ではクメイシ科の比率が約 30% と最も高く, ミドリイシ属, その他のサンゴがそれぞれ約 20% の比率を占めていた。

#### (2) 防波堤と天然礁の水深とサンゴ被度の関係

那覇港の防波堤と天然礁の水深とサンゴ被度の関係を比較した。図-3.23 に那覇港における水深とサンゴ総被度, サンゴ種類別被度の総被度全体に占める比率の関係を示す。防波堤港外側では LWL-0.5~3.5 m と LWL -7.0~-8.0 m で総被度の中央値が 20% 以上, 防波堤港内側では LWL0~-0.5 m で総被度が 20% となっているが, 天然礁では LWL-7.5~-12.0 m にかけて被度の中央値が 20% 以上となる水深帯が見られ, 防波堤よりも深い水深帯で被度が高くなった。サンゴの種類別被度の比率を見ると, 防波堤港外側では LWL0~-8.0 m にかけてミドリイシ属とハナヤサイサンゴ属が内訳のほとんどを占めており, ミドリイシ属の比率が概ね 40% 以上と高くなっていた。防波堤港内側では LWL0~-6.5 m にかけてアナサンゴモドキ属の比率が概ね 40% 以上と高かった。天然礁では LWL0~-3.0 m ではミドリイシ属とコモンサンゴ属が概ね主体となっているが, 深くなるにつれてクメイシ科やハマサンゴ属, その他の属のサンゴの比率が高かった。

#### (3) 防波堤と天然礁の調査年度とサンゴ被度の関係

那覇港の防波堤と天然礁の調査年度とサンゴ被度の関係を比較した。図-3.24, 図-3.25 に那覇港の防波堤と天然礁の調査年度とサンゴ総被度, ミドリイシ属被度, サンゴ種

類別被度の総被度に占める比率を示す。那覇港の防波堤では 1998 年以前からサンゴ総被度が概ね 20%程度であった。1998 年の白化により総被度が大きく低下したが、約 6 年程度で元の被度まで回復し、2013 年にやや減少したもののその後回復し、2018 年も 1998 年白化前の水準を保っていた。天然礁では白化前は 40%程度あった総被度が 1998 年以降大きく減少し、緩やかな回復傾向にあるものの 2018 年時点で総被度は 10%程度と防波堤よりも低くなっている。種類別被度を見ると、防波堤では 1998 年以降ミドリイシ属の被度が増加し、総被度が回復しているが、天然礁では 1998 年以降ミドリイシ属の被度があまり回復していない。種類別被度の総被度に占める比率を見ても、防波堤ではミドリイシ属やハナヤサイサンゴ属が主体となっているが、天然礁では 1998 年の白化以降はミドリイシ属の比率が大きく低下し、キクメイシ科やその他の属のサンゴが主体となっている。

表-3.1 通常防波堤と生物共生型防波堤の延長 1 m あたりの表面積，サンゴ総被度，サンゴ面積，整備費用，費用対サンゴ着生効果（サンゴ面積/整備費用）．カッコ内の数値は通常防波堤（Control）に対する比率（/Control）を表す．

| 防波堤の種類 <sup>a</sup>         | 表面積<br>(m <sup>2</sup> ) | サンゴ総被度<br>(%) | サンゴ面積<br>(m <sup>2</sup> ) | 整備費用<br>(千円) | 費用対サンゴ着生効果<br>(cm <sup>2</sup> /1,000 円) |
|-----------------------------|--------------------------|---------------|----------------------------|--------------|------------------------------------------|
| <b>Control</b>              | 93.68                    | 10.83         | 10.15                      | 25,406       | <b>4.00</b>                              |
|                             | (1.00)                   | (1.00)        | (1.00)                     | (1.00)       | (1.00)                                   |
| <b>PB<sub>shallow</sub></b> | 104.05                   | 11.08         | 11.53                      | 27,632       | <b>4.17</b>                              |
|                             | (1.11)                   | (1.02)        | (1.14)                     | (1.09)       | (1.04)                                   |
| <b>PB<sub>deep</sub></b>    | 106.30                   | 11.67         | 12.41                      | 28,016       | <b>4.43</b>                              |
|                             | (1.13)                   | (1.08)        | (1.22)                     | (1.10)       | (1.11)                                   |

<sup>a</sup> Control, 通常防波堤; PB<sub>shallow</sub>, ATP 設置水深が浅い生物共生型防波堤; PB<sub>deep</sub>, ATP 設置水深が深い生物共生型防波堤

表-3.2 各防波堤の延長 1 m あたりの整備費用の内訳．カッコ内の数値は通常防波堤（Control）からの差分を表す．

|            |                      | <b>Control</b> | <b>PB<sub>shallow</sub></b> | <b>PB<sub>deep</sub></b> |
|------------|----------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|
| <b>港内側</b> | 基礎工                  | 2,036          | 1,841 (−195)                | 2,109 (+73)              |
|            | 被覆工                  | 944            | 1,287 (+343)                | 1,516 (+572)             |
|            | 根固工                  | 111            | 111 (0)                     | 128 (+17)                |
|            | マウンドの嵩上げ             | 0              | 1,864 (+1,864)              | 1,901 (+1,901)           |
|            | <b>小計</b>            | <b>3,091</b>   | <b>5,103 (+2,012)</b>       | <b>5,654 (+2,563)</b>    |
|            |                      |                |                             |                          |
| <b>港外側</b> | 基礎工                  | 2,892          | 2,892 (0)                   | 2,906 (+14)              |
|            | 被覆工                  | 1,446          | 1,446 (0)                   | 1,446 (0)                |
|            | 消波工                  | 3,458          | 3,458 (0)                   | 3,401 (−57)              |
|            | 消波ブロック凹凸加工           | 0              | 67 (+67)                    | 67 (+67)                 |
|            | 根固工                  | 223            | 223 (0)                     | 255 (+32)                |
|            | <b>小計</b>            | <b>8,019</b>   | <b>8,086 (+67)</b>          | <b>8,075 (+56)</b>       |
| <b>その他</b> | 基礎工（ケーソン下）           | 2,640          | 2,614 (−26)                 | 2,786 (+146)             |
|            | 本体工（ケーソン）            | 9,433          | 9,387 (−46)                 | 9,078 (−355)             |
|            | 直立壁面凹凸加工（ケーソン）       | 0              | 61 (+61)                    | 61 (+61)                 |
|            | ATP 設置（FRP グレーチング加工） | 0              | 383 (+383)                  | 383 (+383)               |
|            | 上部工                  | 2223           | 1,998 (−225)                | 1,979 (−244)             |
|            | <b>小計</b>            | <b>14,296</b>  | <b>14,443 (+147)</b>        | <b>1,4287 (−9)</b>       |
|            |                      |                |                             |                          |
| <b>合計</b>  |                      | <b>25,406</b>  | <b>27,632 (+2,226)</b>      | <b>28,016 (+2,610)</b>   |

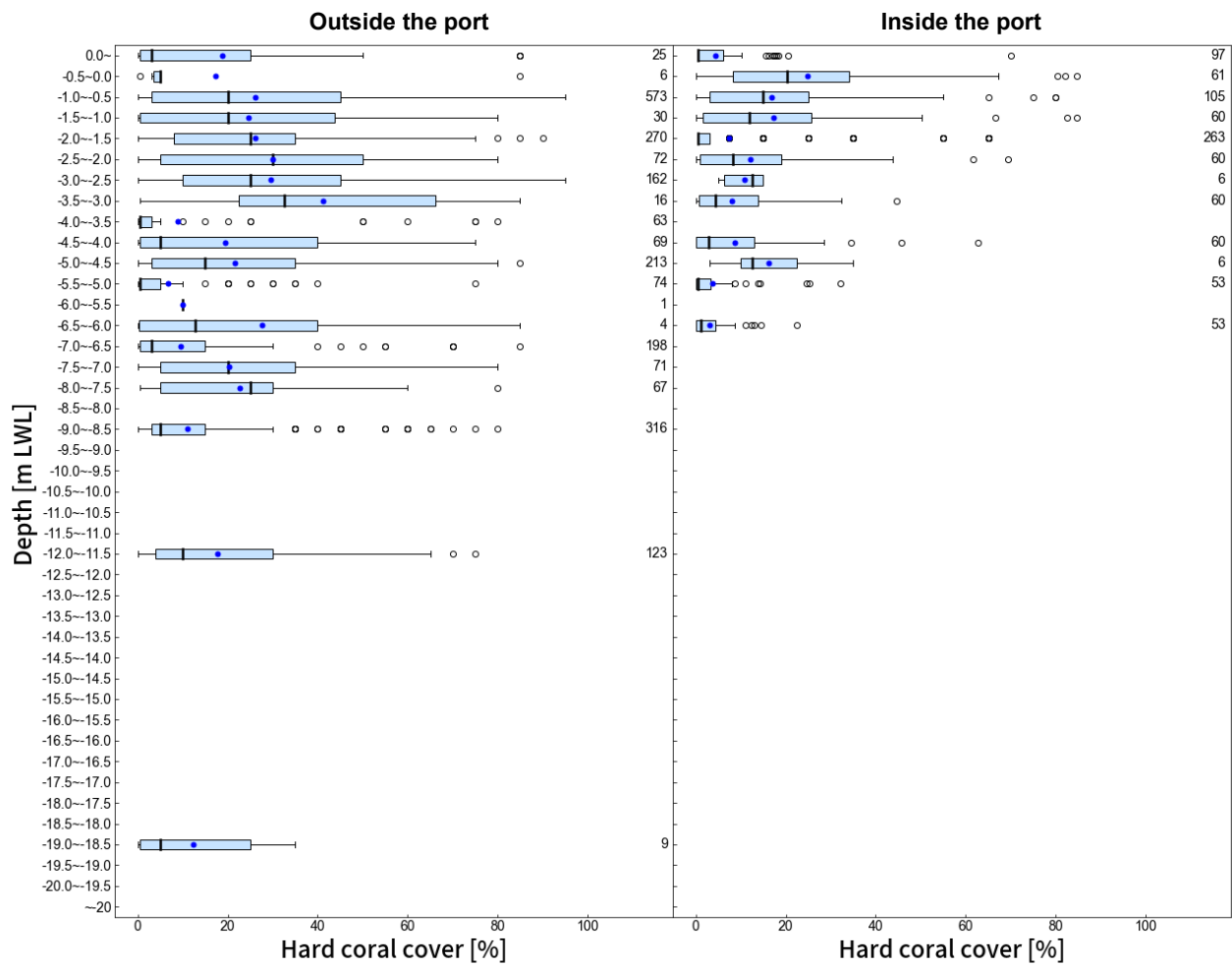


図-3.1 那覇港防波堤の港外側、港内側の水深とサンゴ総被度の関係

水深 0.5 m ごと ( $d_1 \leq x < d_2$ ) に、各区間の被度を箱ひげ図で表す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし、左端から順に外れ値を除く最小値、第一四分位数、中央値（黒い太線）、第三四分位数、外れ値を除く最大値を表す。青点は平均値、白丸は外れ値を表す。各パネルの右端に各区間のデータ数を示す。

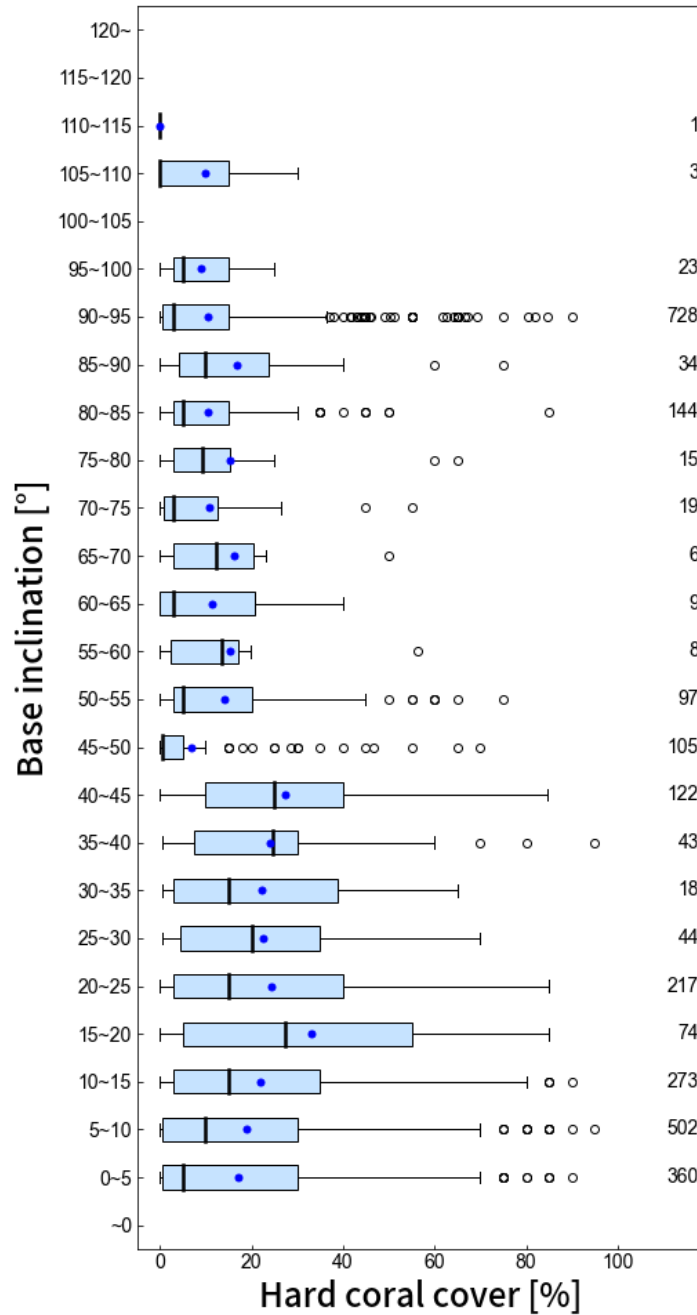


図-3.2 那覇港防波堤の基盤傾度とサンゴ総被度の関係

基盤傾度  $5^\circ$  ごと ( $\theta_1 \leq x < \theta_2$ ) に、各区間の被度を箱ひげ図で表す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし、左端から順に外れ値を除く最小値、第一四分位数、中央値（黒い太線）、第三四分位数、外れ値を除く最大値を表す。青点は平均値、白丸は外れ値を表す。各パネルの右端に各区間のデータ数を示す。

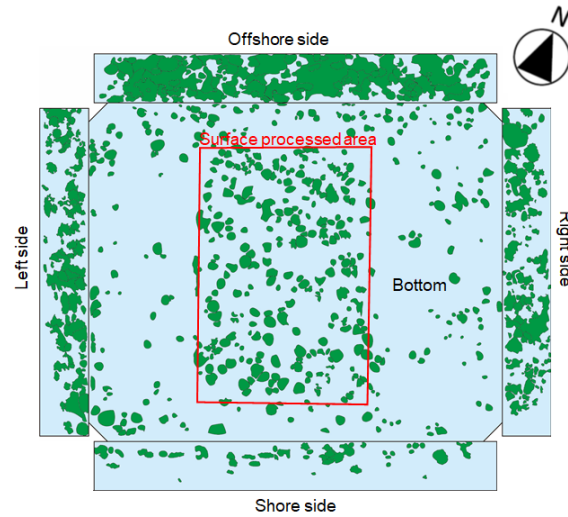


図-3.3 ATP (FRP グレーチング加工区 St.4-3) のサンゴのマッピング図  
各サンゴ群体を緑色でマッピングしている。赤枠は加工部 (FRP グレーチング) を表す。

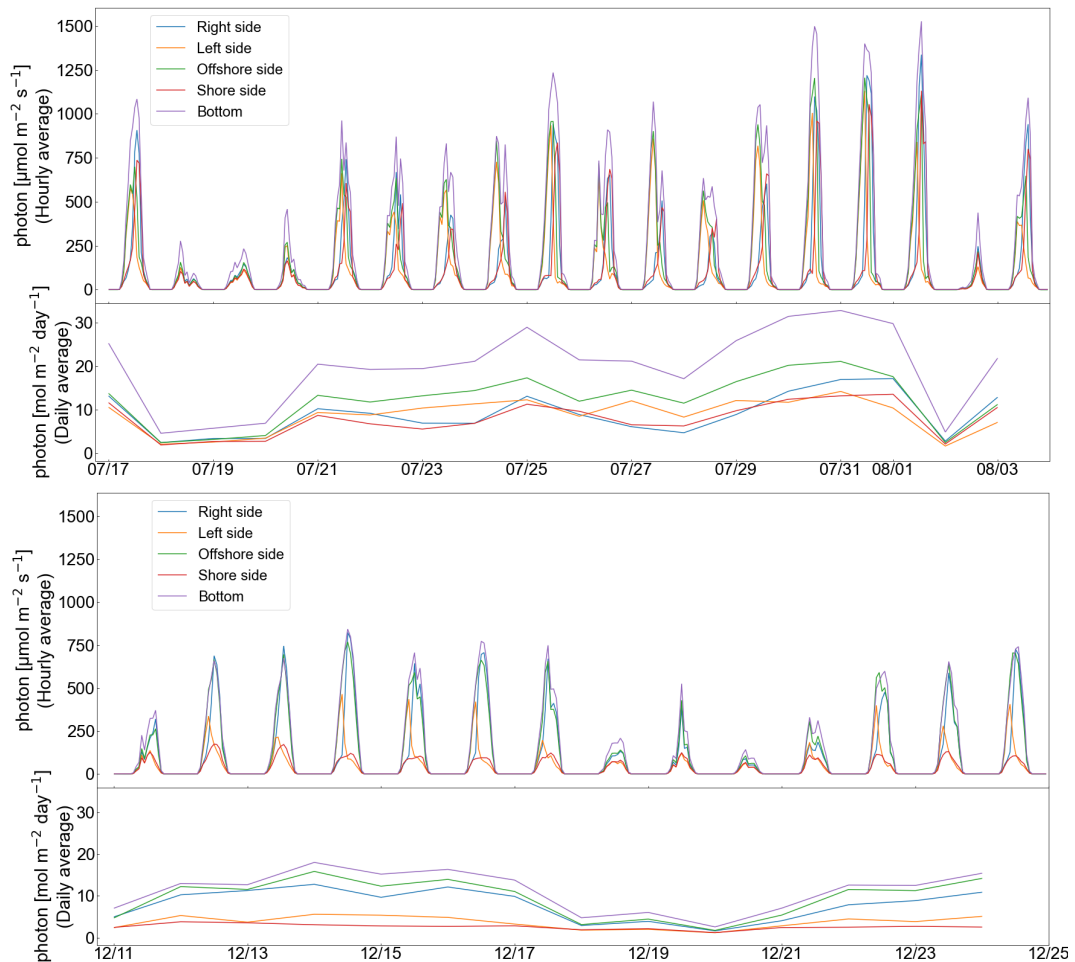


図-3.4 ATP (FRP グレーチング加工区 St.4-3) の各壁面の光量子の観測結果

上のパネルが2019年7月17日～8月3日の光量子の観測結果、下のパネルが2019年12月11日～12月24日の光量子の観測結果を表す。各パネルの上段が1時間平均、下段が日平均の光量子を表す。紫が底面、緑が沖側面、青が左側面、オレンジが右側面、赤が岸側面の結果を表す。

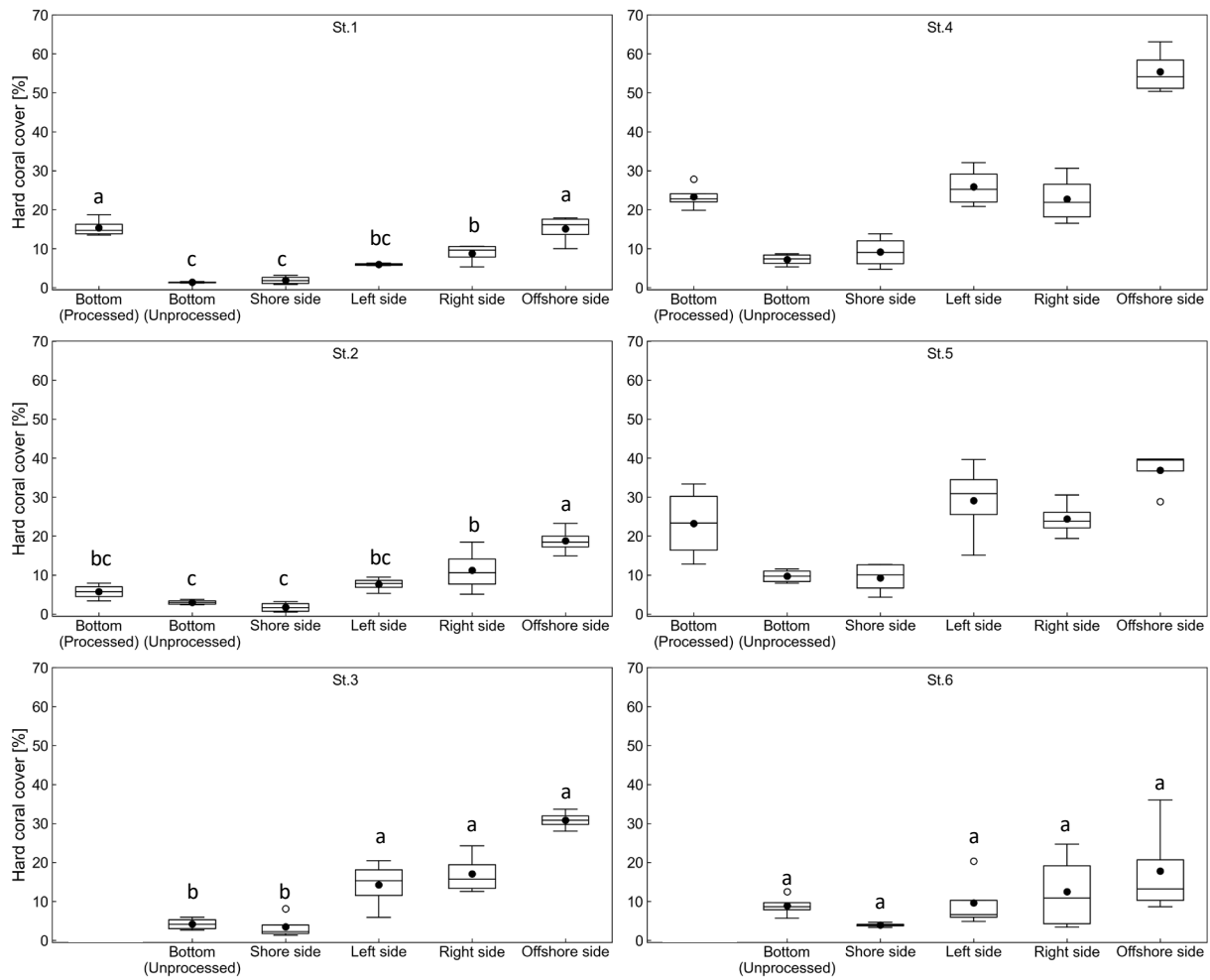


図-3.5 ATP の各壁面のサンゴ被度

St.1 (天端高 LWL+1.0 m, FRP グレーチング加工区), St.2 (天端高 LWL+1.0 m, 凹凸加工区), St.3 (天端高 LWL+1.0 m, 無加工区), St.4 (天端高 LWL+0.7 m, FRP グレーチング加工区), St.5 (天端高 LWL+0.7 m, 凹凸加工区), St.6 (天端高 LWL+0.7 m, 無加工区) の結果を表す. 各 St.のパネルでは左から順に底面 (加工部, St.1,2,4,5 のみ), 底面 (無加工部), 岸側面, 左側面, 右側面, 沖側面の結果を表す. 各壁面のサンゴ被度は各 St.の ATP4 桁分の被度から求めた ( $n = 4$ ). 箱ひげ図は箱の両端 (四分位数) を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし, 下端から順に外れ値を除く最小値, 第一四分位数, 中央値, 第三四分位数, 外れ値を除く最大値を表す. 黒点は平均値, 白丸は外れ値を表す. 各群間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合は, 平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り, 有意差がない場合 ( $p \geq 0.05$ ) には同じ記号を振った.

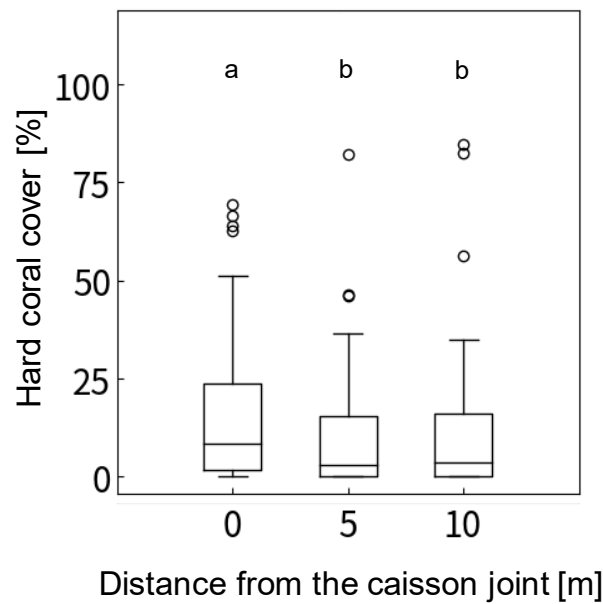


図-3.6 防波堤港内側ケーソン直立壁面における目地からの距離とサンゴ被度の関係（棚谷ら，2019 を改変）

箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の1.5倍の範囲外の値を外れ値とし，下端から順に外れ値を除く最小値，第一四分位数，中央値，第三四分位数，外れ値を除く最大値を表す．白丸は外れ値を表す．目地からの距離は目地から方形枠の左端までの距離を表す．各群間に有意差（ $p < 0.05$ ）がある場合は，平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り，有意差がない場合（ $p \geq 0.05$ ）には同じ記号を振った．

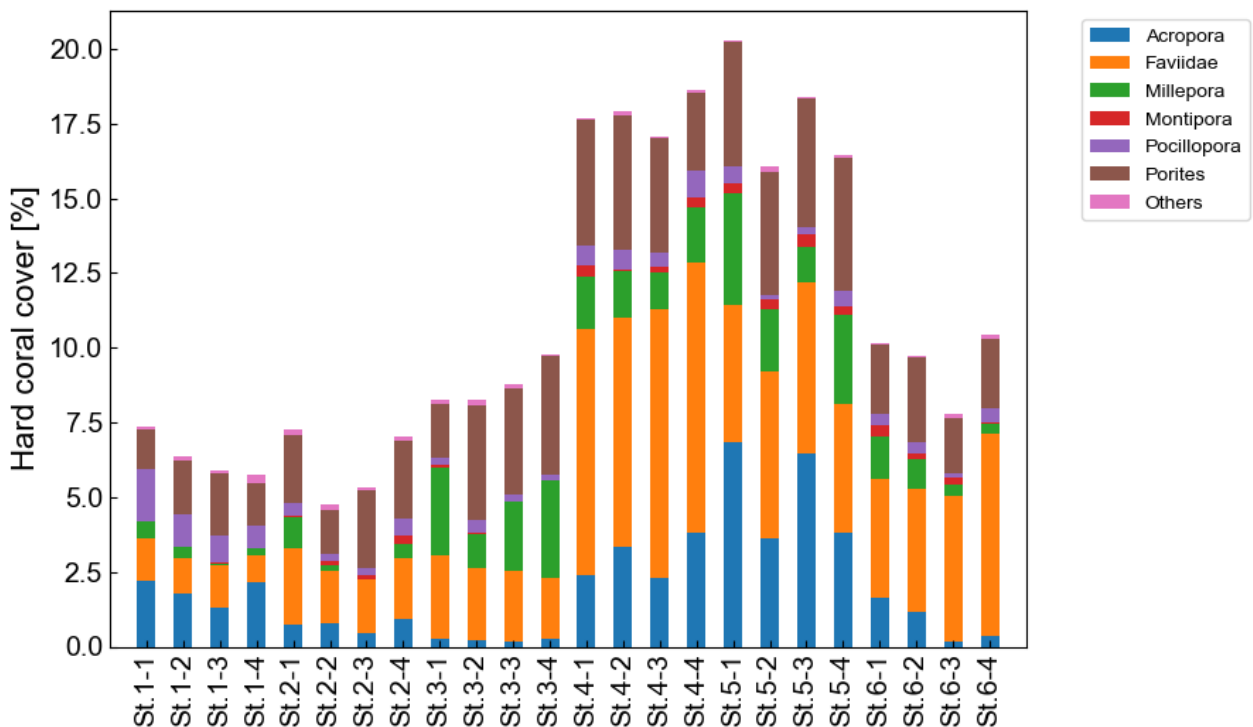


図-3.7 ATP の各柵のサンゴ分布状況

各柵の種類別の被度を表す．青がミドリイシ属，オレンジがキクメイシ科，緑がアナサンゴモドキ属，赤がコモンサンゴ属，紫がハナヤサイサンゴ属，茶色がハマサンゴ属，ピンクがその他のサンゴの被度をそれぞれ表す．

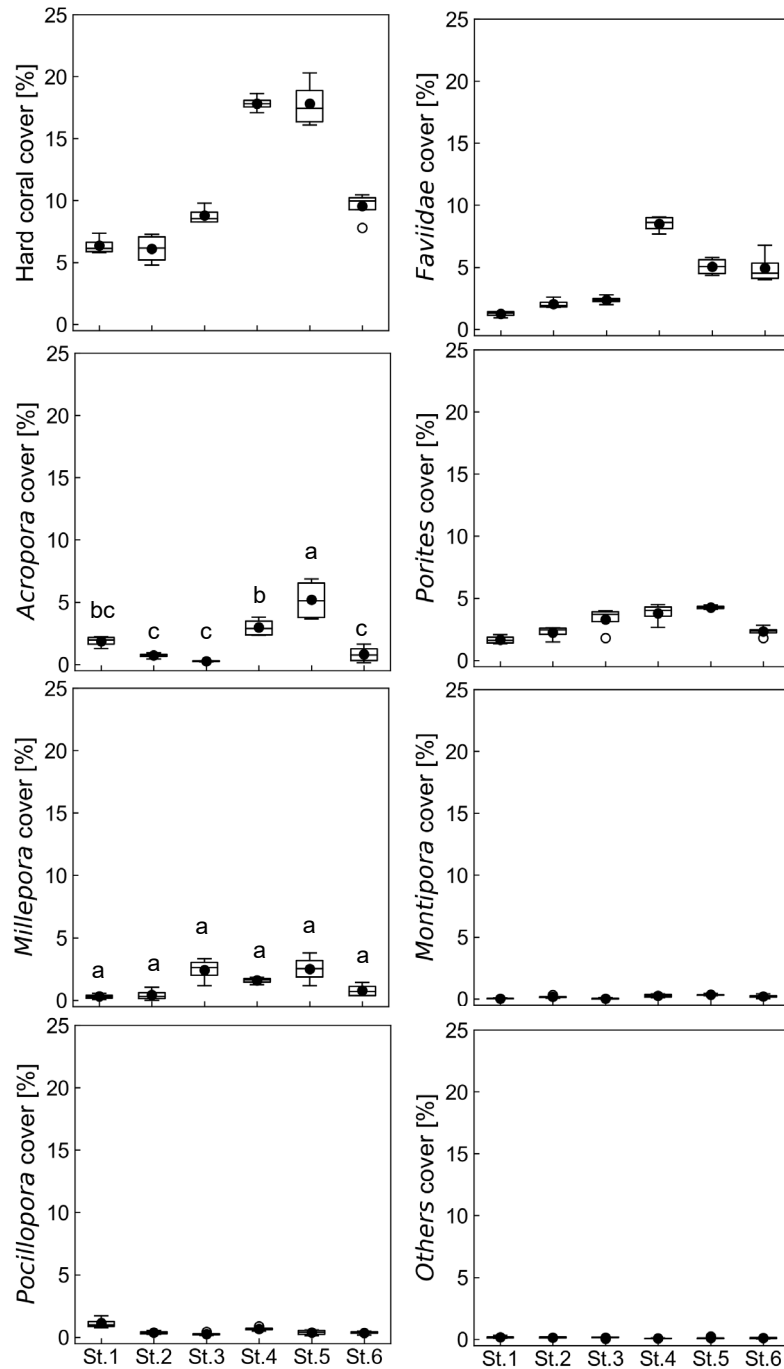


図-3.8 ATP の各 St.のサンゴ総被度と種別被度

グラフは左列は上から順にサンゴ総被度、ミドリイシ属被度、アナサンゴモドキ属被度、ハナヤサイサンゴ属被度、右列は上から順にキクメイシ科被度、ハマサンゴ属被度、コモンサンゴ属被度、その他のサンゴの被度を表す。各パネルでは左から順に St.1 (天端高 LWL+1.0 m, FRP グレーチング加工区), St.2 (天端高 LWL+1.0 m, 凹凸加工区), St.3 (天端高 LWL+1.0 m, 無加工区), St.4 (天端高 LWL+0.7 m, FRP グレーチング加工区), St.5 (天端高 LWL+0.7 m, 凹凸加工区), St.6 (天端高 LWL+0.7 m, 無加工区) の結果を表す。各 St.のサンゴ被度は ATP4 桁分の被度から求めた ( $n=4$ )。箱ひげ図は箱の両端 (四分位数) を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし、下端から順に外れ値を除く最小値, 第一四分位数, 中央値, 第三四分位数, 外れ値を除く最大値を表す。黒点は平均値, 白丸は外れ値を表す。各群間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合は, 平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り, 有意差がない場合 ( $p \geq 0.05$ ) には同じ記号を振った。

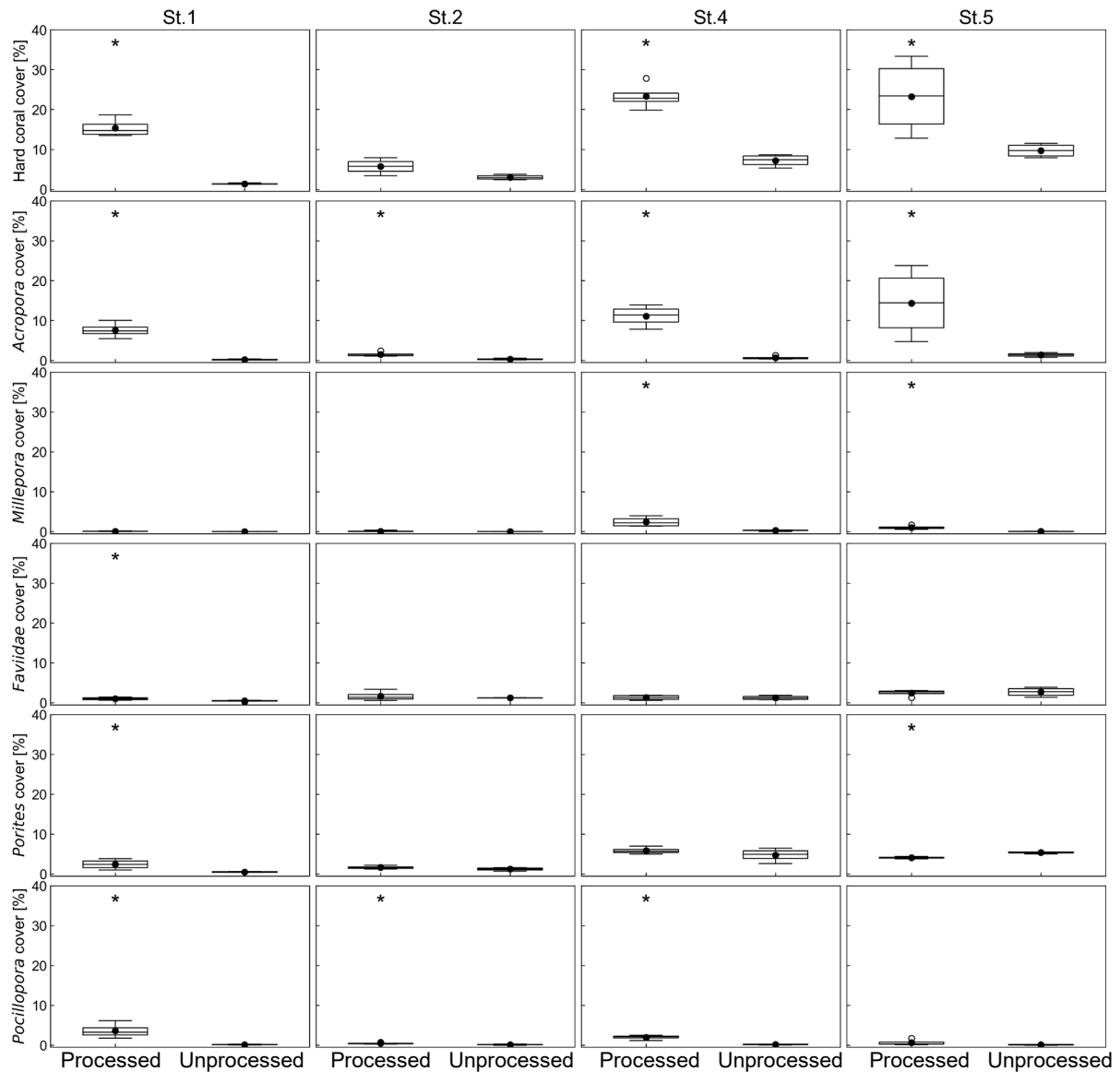


図-3.9 ATP 底面の加工部と無加工部のサンゴ被度

左列から右列に向かって St.1 (天端高 LWL+1.0 m, FRP グレーチング加工区), St.2 (天端高 LWL+1.0 m, 凹凸加工区), St.4 (天端高 LWL+0.7 m, FRP グレーチング加工区), St.5 (天端高 LWL+0.7 m, 凹凸加工区) の結果を表す。上段から順にサンゴ総被度, ミドリイシ属, アナサンゴモドキ属, キクメイシ科, ハマサンゴ属, ハナヤサイサンゴ属の被度を示す。各 St.ごとに ATP4 桁のサンゴ被度を箱ひげ図で表す ( $n=4$ )。各パネルの左側が加工部, 右側が無加工部の結果である。箱ひげ図は箱の両端 (四分位数) を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし, 下端から順に外れ値を除く最小値, 第一四分位数, 中央値, 第三四分位数, 外れ値を除く最大値を表す。黒点は平均値, 白丸は外れ値を表す。加工部-無加工部間で被度に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合, 被度が高い方にアスタリスク (\*) を付した。

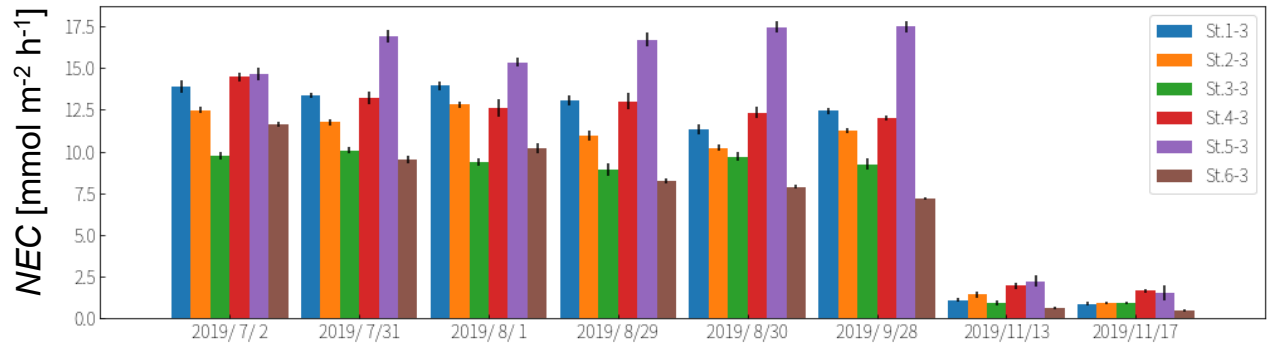


図-3.10 ATP の昼間および夜間の生態系の正味の石灰化速度 (NEC)

エラーバーは TA の時間変化の傾きの標準偏差に起因する NEC の標準偏差 (SD) を表す。

2019 年 7 月～9 月は昼間の結果, 2019 年 11 月は夜間の結果を示す。

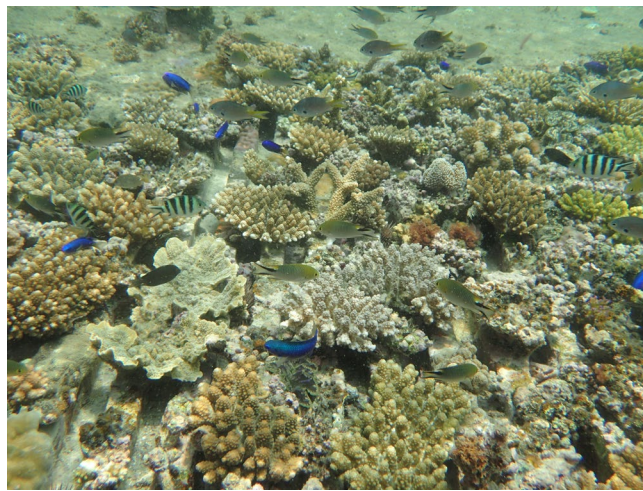


図-3.11 ATP の魚類の蟬集状況の例 (St.5-1)

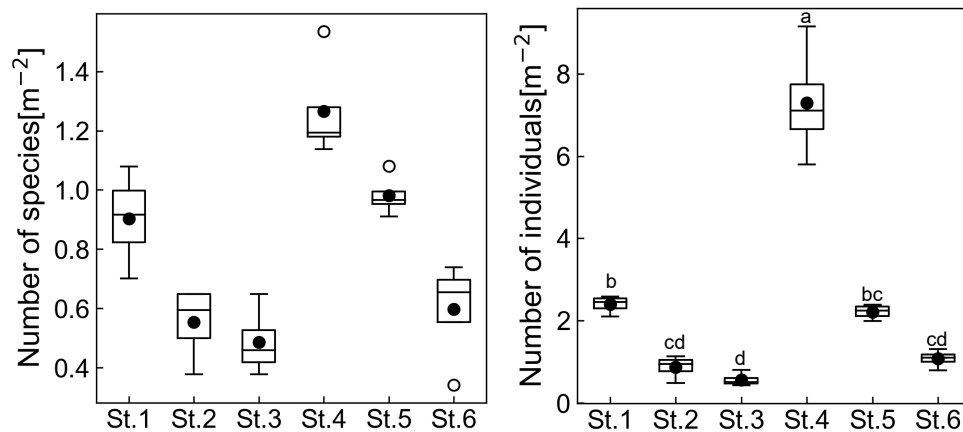


図-3.12 ATP の魚類の種類数と個体数

左図が各 St. の ATP の底面  $1 \text{ m}^2$  あたりの魚類の種類数, 右図が ATP の底面  $1 \text{ m}^2$  あたりの魚類の個体数を表す ( $n = 4$ ). 箱ひげ図は箱の両端 (四分位数) を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし, 下端から順に外れ値を除く最小値, 第一四分位数, 中央値, 第三四分位数, 外れ値を除く最大値を表す. 黒点は平均値, 白丸は外れ値を表す. 各群間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合は, 平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り, 有意差がない場合 ( $p \geq 0.05$ ) には同じ記号を振った.

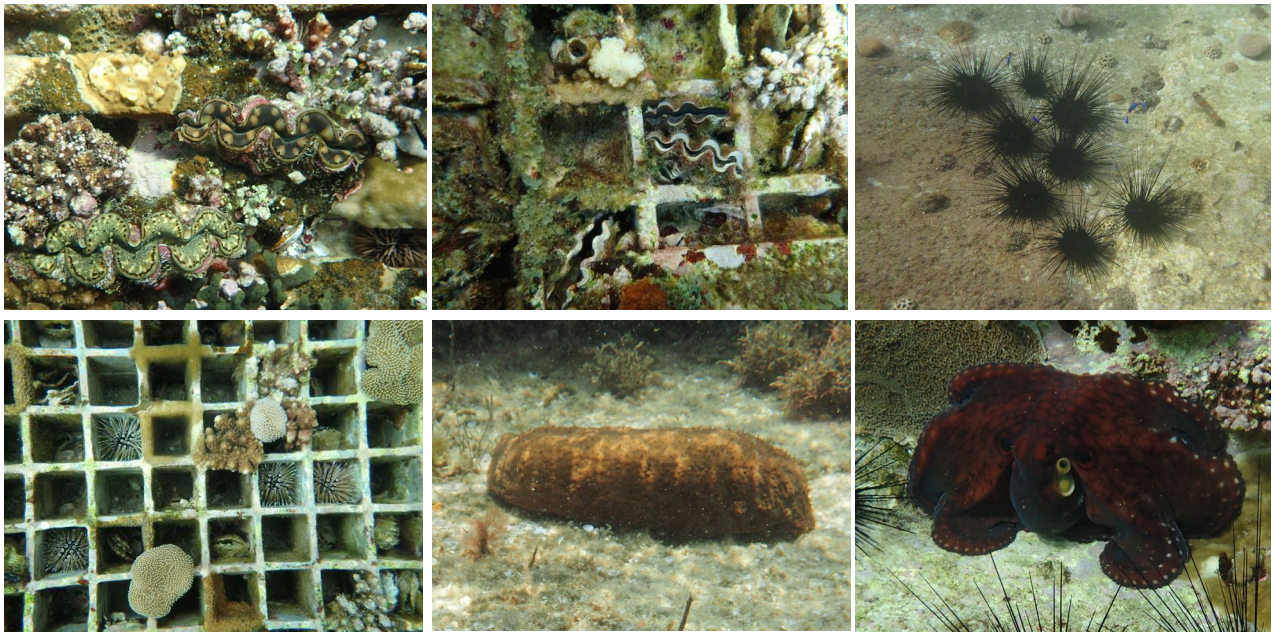


図-3.13 ATP に分布する大型底生生物の例

(a), (b) シャコガイ類, (c) ガンガゼ類, (d) ナガウニ類, (e) ナマコ類, (f) タコ類の写真を示す.

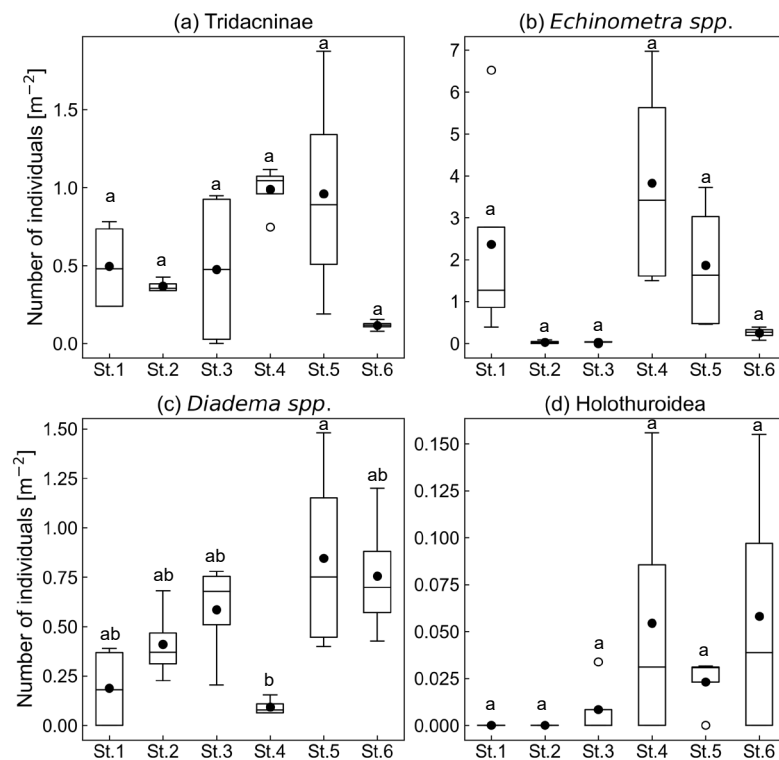


図-3.14 ATP のシャコガイ類, ナガウニ類, ガンガゼ類, ナマコ類の個体数

(a) シャコガイ亜科, (b) ナガウニ属, (c) ガンガゼ属, (d) ナマコ綱の ATP の底面と側面 1 m<sup>2</sup>あたりの個体数を表す ( $n=4$ ). 箱ひげ図は箱の両端(四分位数)を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし, 下端から順に外れ値を除く最小値, 第一四分位数, 中央値, 第三四分位数, 外れ値を除く最大値を表す. 黒点は平均値, 白丸は外れ値を表す. 各群間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合は, 平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り, 有意差がない場合 ( $p \geq 0.05$ ) には同じ記号を振った.

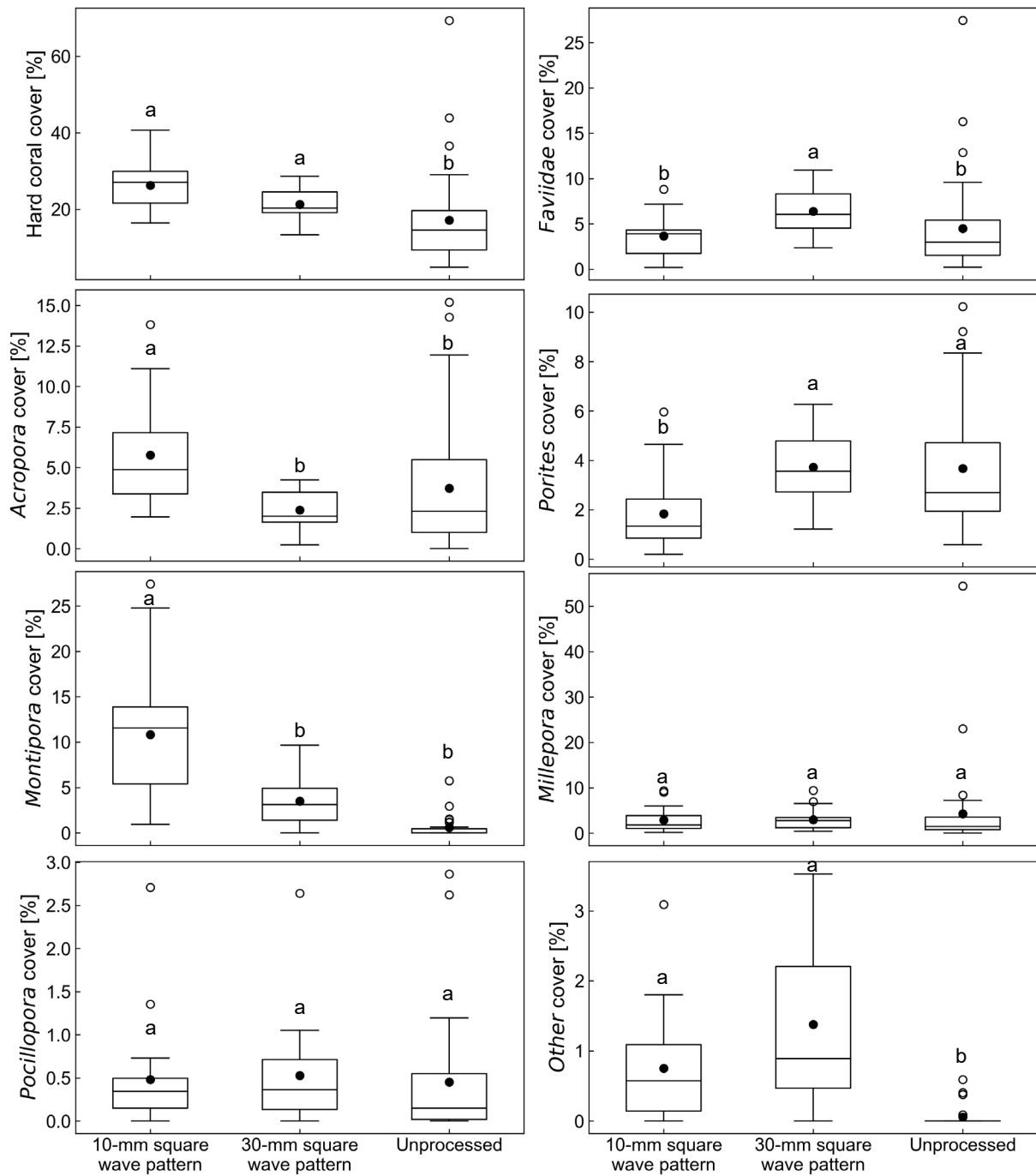


図-3.15 直立部の凹凸加工パネル（設置水深 LWL-2~3 m）のサンゴ着生状況

左列の上から順にサンゴ総被度、ミドリイシ属被度、コモンサンゴ属被度、ハナヤサイサンゴ属被度、右列の上から順にキクメイシ科被度、ハマサンゴ属被度、アナサンゴモドキ属被度、その他のサンゴの被度を表す。各パネルの左から順に 10 mm 凹凸加工パネル ( $n = 19$ )、30 mm 凹凸加工パネル ( $n = 20$ )、無加工区 ( $n = 34$ ) の結果を示す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし、下端から順に外れ値を除く最小値、第一四分位数、中央値、第三四分位数、外れ値を除く最大値を表す。黒点は平均値、白丸は外れ値を表す。各群間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合は、平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り、有意差がない場合 ( $p \geq 0.05$ ) には同じ記号を振った。

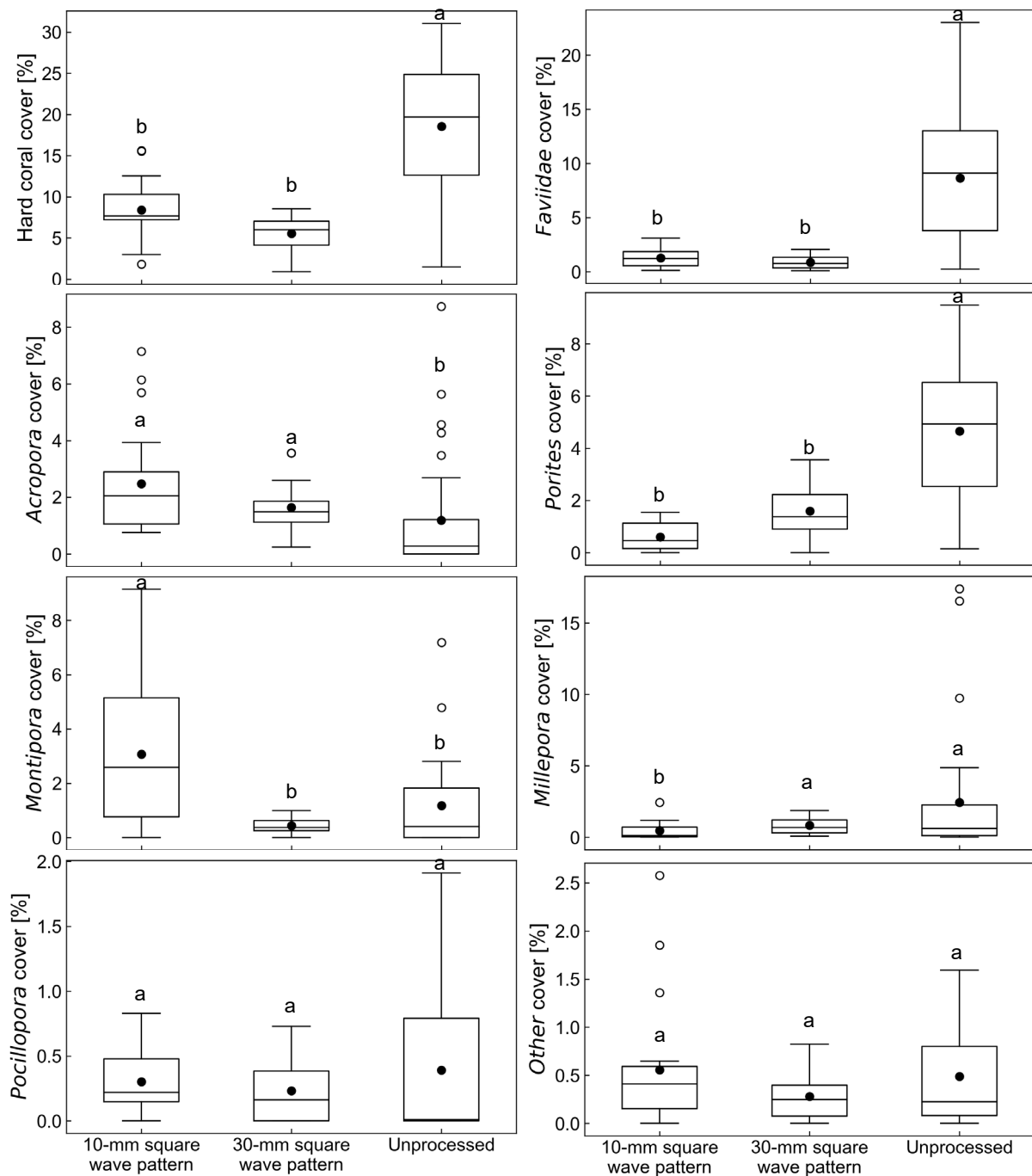


図-3.16 直立部の凹凸加工パネル（設置水深 LWL-4~5 m）のサンゴ着生状況

左列の上から順にサンゴ総被度、ミドリイシ属被度、コモンサンゴ属被度、ハナヤサイサンゴ属被度、右列の上から順にキクメイシ科被度、ハマサンゴ属被度、アナサンゴモドキ属被度、その他のサンゴの被度を表す。各パネルの左から順に 10 mm 凹凸加工パネル ( $n = 20$ )、30 mm 凹凸加工パネル ( $n = 20$ )、無加工区 ( $n = 33$ ) の結果を示す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし、下端から順に外れ値を除く最小値、第一四分位数、中央値、第三四分位数、外れ値を除く最大値を表す。黒点は平均値、白丸は外れ値を表す。各群間に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合は、平均値が大きい順にアルファベット a から順に記号を振り、有意差がない場合 ( $p \geq 0.05$ ) には同じ記号を振った。

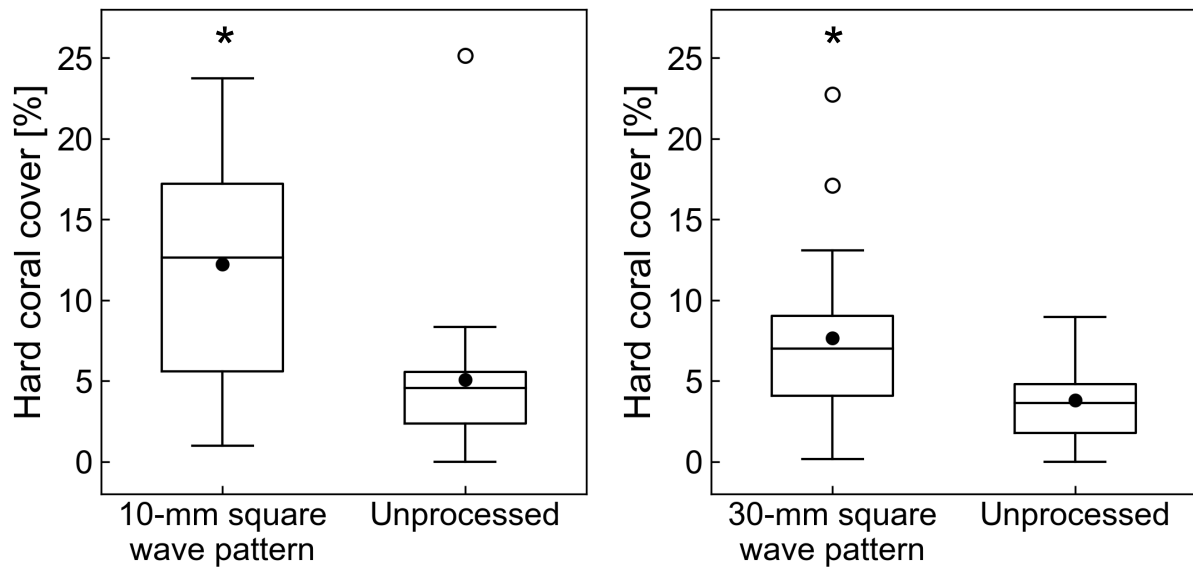


図-3.17 浦添第一防波堤の凹凸加工消波ブロックの凹凸加工区と無加工区のサンゴ被度

左図が 10 mm 凹凸加工区と隣接する無加工区のサンゴ被度の比較、右図が 30 mm 凹凸加工区と隣接する無加工区のサンゴ被度の比較を表す。箱ひげ図の下端から順に最小値、第一四分位数、中央値、第三四分位数、最大値を表す。バツ印は平均値、白丸は外れ値を表す。加工区-無加工区間で被度に有意差 ( $p < 0.05$ ) がある場合、被度が高い方にアスタリスク (\*) を付した。

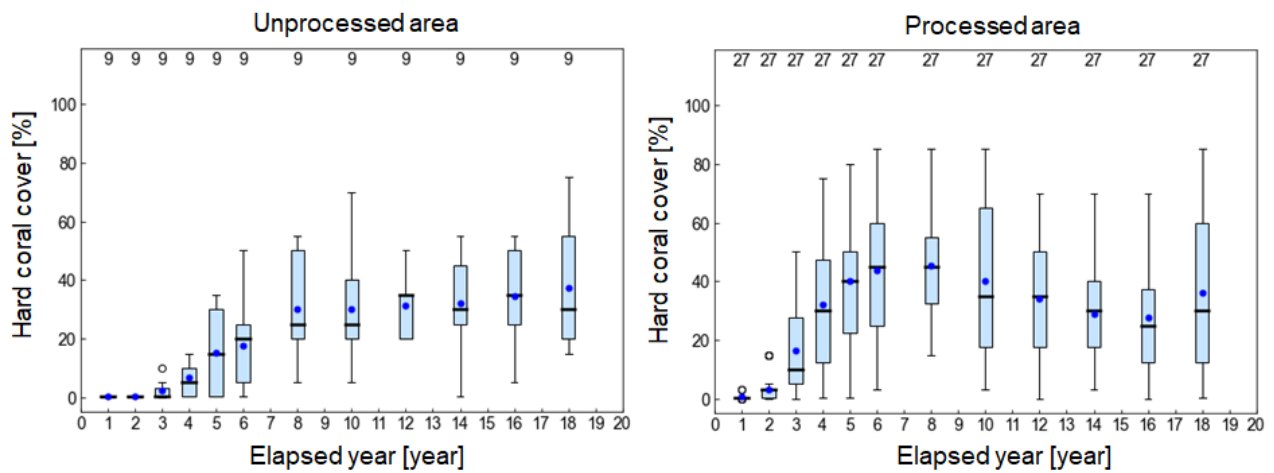


図-3.18 那覇防波堤の凹凸加工消波ブロックの無加工区と凹凸加工区のサンゴ被度の経年変化

箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の 1.5 倍の範囲外の値を外れ値とし、下端から順に外れ値を除く最小値、第一四分位数、中央値（黒い太線）、第三四分位数、外れ値を除く最大値を表す。青丸は平均値、白丸は外れ値を表す。

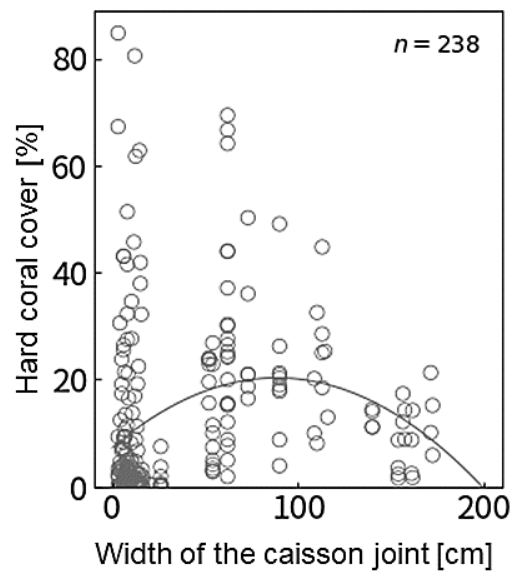


図-3.19 浦添第一防波堤の目地幅とサンゴ被度の関係（棚谷ら，2019 を改変）  
一般化線形モデル推定によって得られた近似曲線を示す。

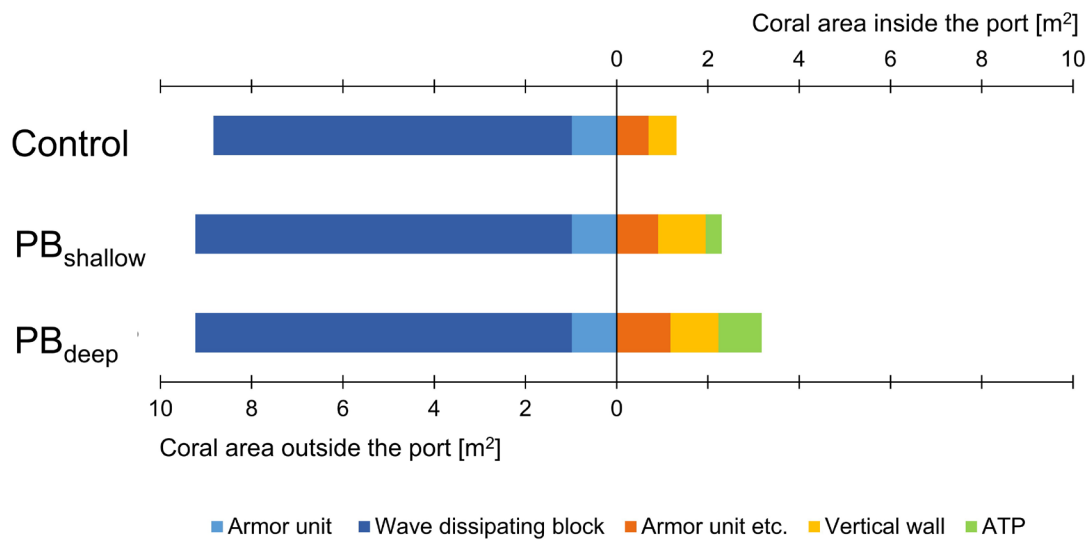


図-3.20 通常断面（Control）と生物共生型防波堤（PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub>）のサンゴ面積  
青は消波ブロック，オレンジは港外側被覆ブロック，黄色は港内側被覆ブロック等（被覆ブロック，根固方塊，直立壁面ではないケーソン本体），水色は直立壁面，緑色は ATP のサンゴ面積をそれぞれ表す。各断面における防波堤部位の位置は図-2.11 に示す（各防波堤部位の色分けは図-2.11 と対応している）。

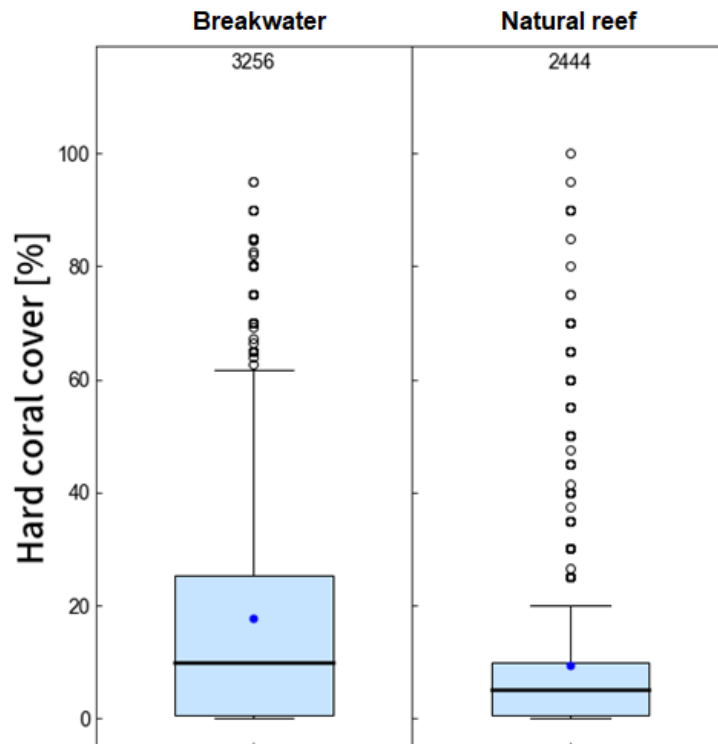


図-3.21 那覇港の防波堤と天然礁のサンゴ総被度

左が防波堤、右が天然礁の結果を表す。パネル上端の数字はデータ数を表す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の1.5倍の範囲外の値を外れ値とし、下端から順に外れ値を除く最小値、第一四分位数、中央値（黒い太線）、第三四分位数、外れ値を除く最大値を表す。青丸は平均値、白丸は外れ値を表す。

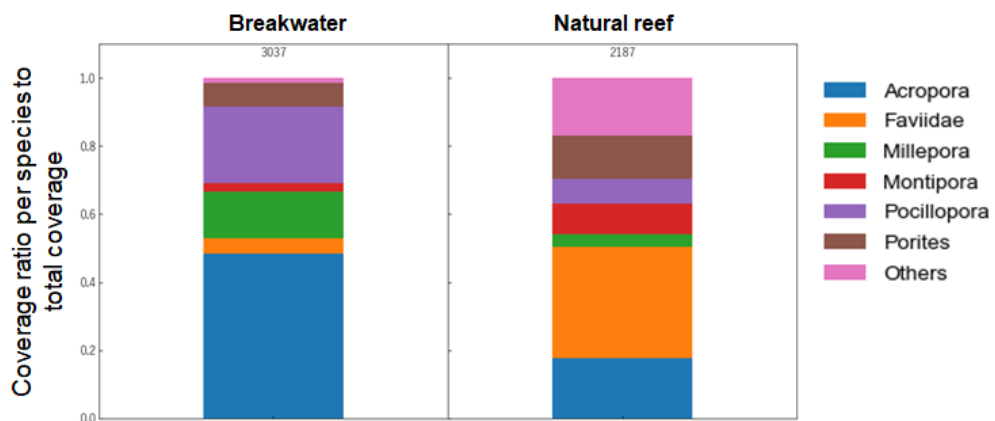


図-3.22 那覇港の防波堤と天然礁のサンゴ種類別被度の総被度に占める比率

左が防波堤、右が天然礁の結果を表す。パネル上端の数字はデータ数を表す。青がミドリイシ属、オレンジがキクメイシ科、緑がアナサンゴモドキ属、赤がコモンサンゴ属、紫がハナヤサイサンゴ属、茶色がハマサンゴ属、ピンクがその他のサンゴを表す。

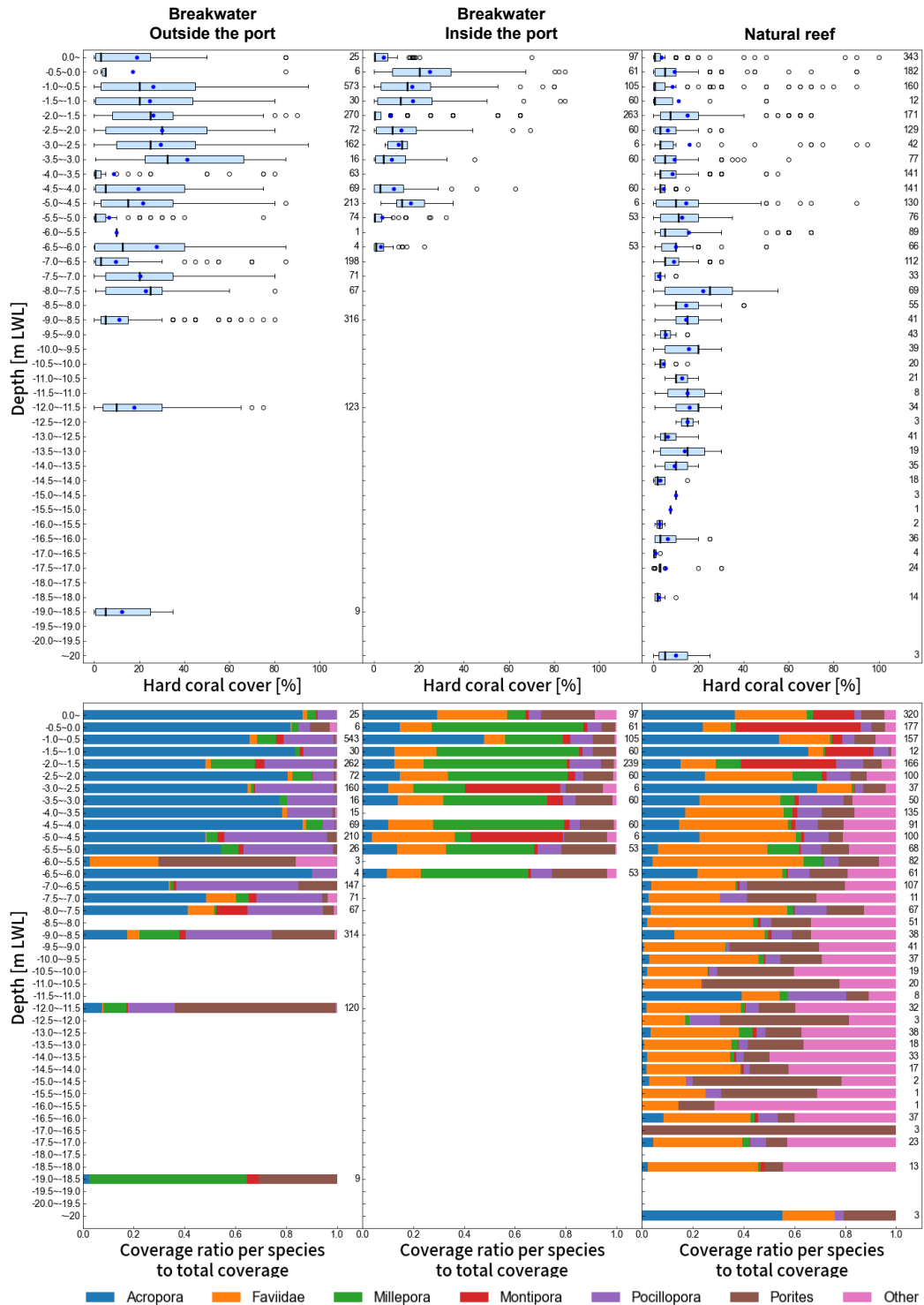


図-3. 23 那覇港の防波堤と天然礁の水深とサンゴの総被度とサンゴ種類別被度の総被度に占める比率の関係

上段が防波堤と天然礁の水深とサンゴの総被度の関係，下段が水深とサンゴ種類別被度の総被度に占める比率を表す。左から防波堤港外側，港内側，天然礁の結果を表す。パネル右端の数字はデータ数を表す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の1.5倍の範囲外の値を外れ値とし，左端から順に外れ値を除く最小値，第一四分位数，中央値（黒い太線），第三四分位数，外れ値を除く最大値を表す。青丸は平均値，白丸は外れ値を表す。サンゴの種類の色分けは青がミドリイシ属，オレンジがククメイシ科，緑がアナサンゴモドキ属，赤がコモンサンゴ属，紫がハナヤサイサンゴ属，茶色がハマサンゴ属，ピンクがその他のサンゴを表す。

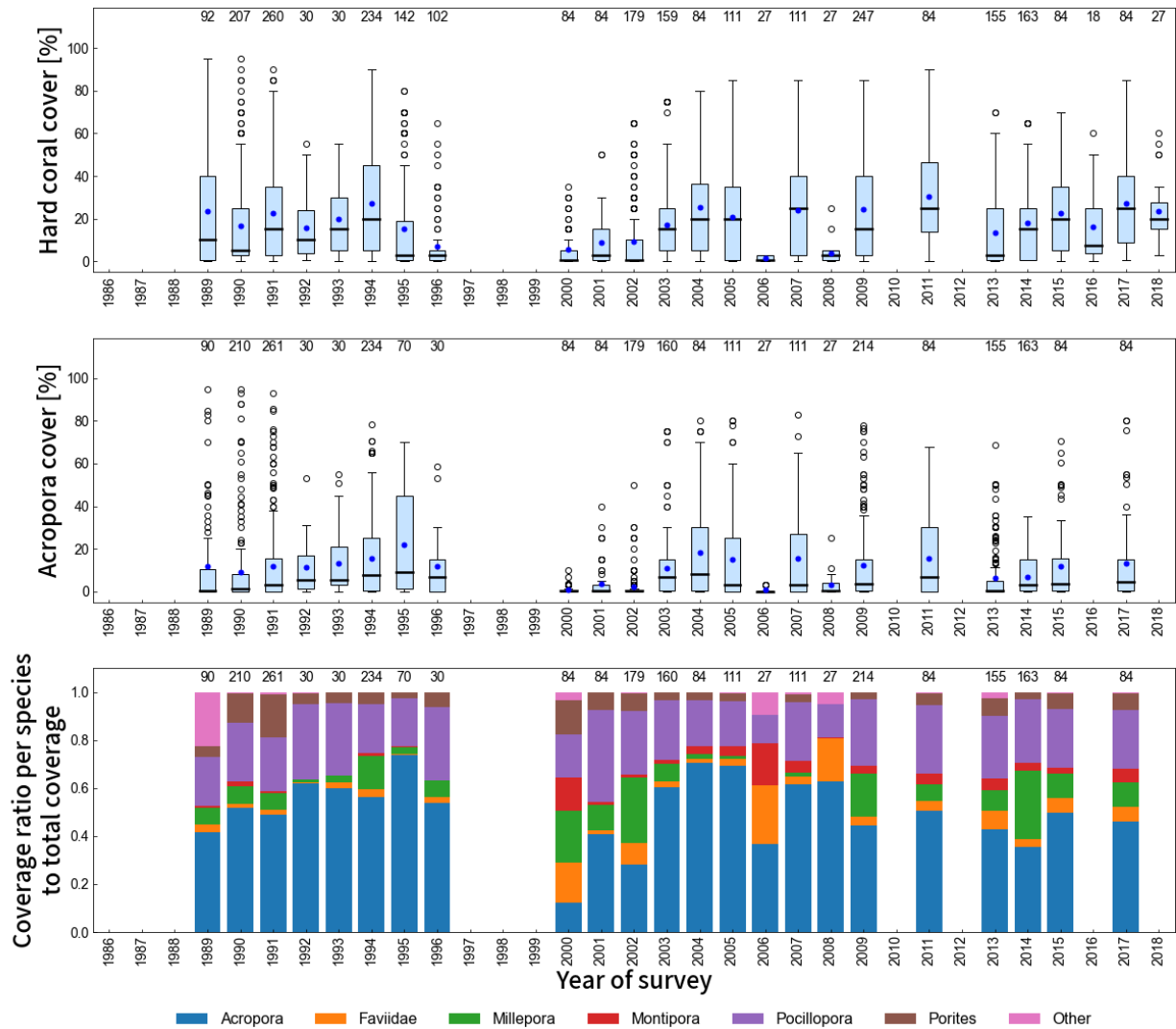


図-3.24 那覇港の防波堤の調査年度とサンゴ総被度，ミドリイシ属被度，サンゴ種類別被度の総被度に占める比率  
上段からサンゴ総被度，ミドリイシ属被度，サンゴ種類別被度の総被度に占める比率を示す．パネル上端の数字はデータ数を表す．箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の1.5倍の範囲外（外れ値）とし，下端から順に外れ値を除く最小値，第一四分位数，中央値（黒い太線），第三四分位数，外れ値を除く最大値を表す．青丸は平均値，白丸は外れ値を表す．サンゴの種類の色分けは青がミドリイシ属，オレンジがククメイシ科，緑がアナサンゴモドキ属，赤がコモンサンゴ属，紫がハナヤサイサンゴ属，茶色がハマサンゴ属，ピンクがその他のサンゴを表す．

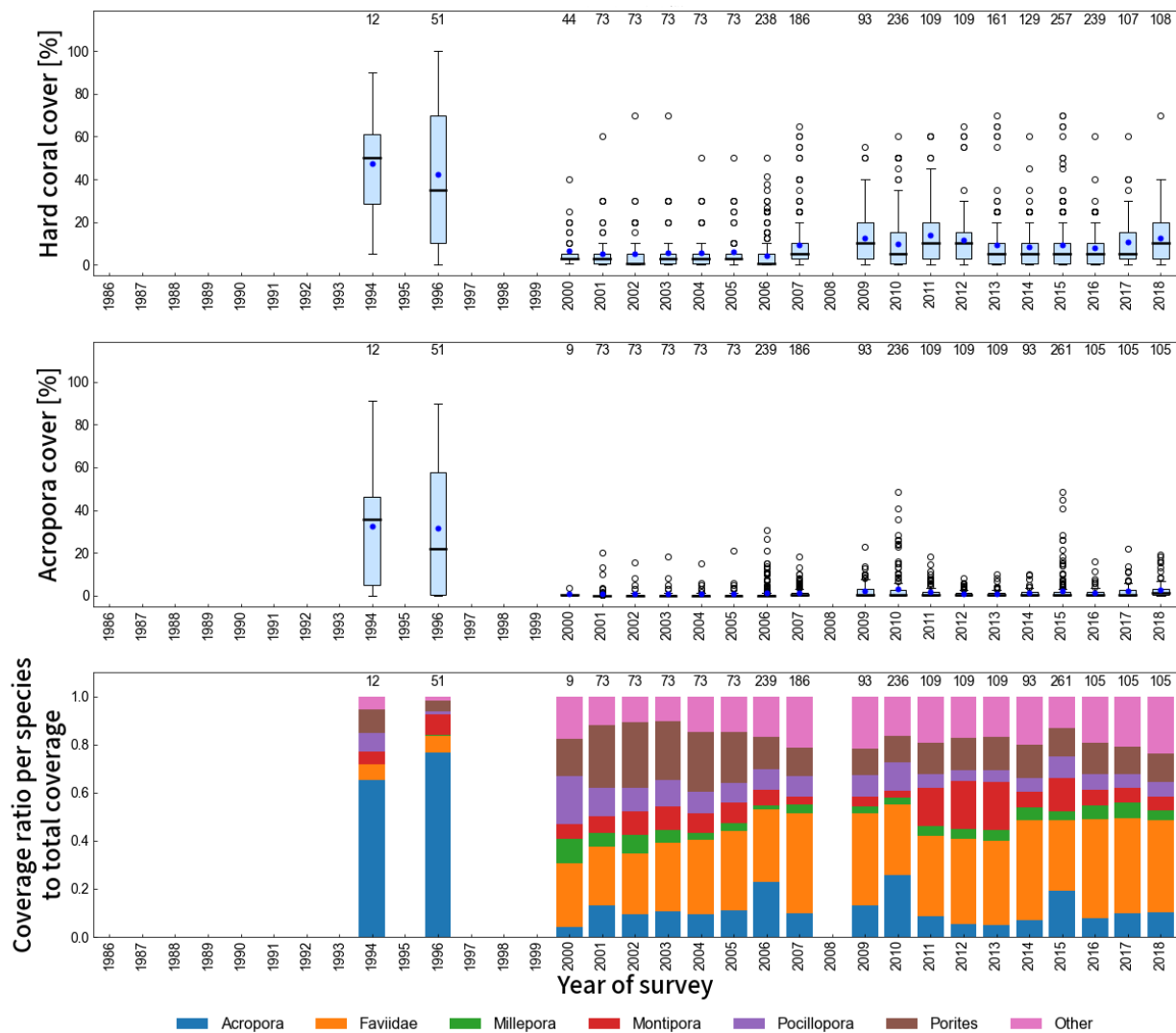


図-3. 25 那覇港の天然礁の調査年度とサンゴ総被度、ミドリイシ属被度、サンゴ種類別被度の総被度に占める比率  
上段からサンゴ総被度、ミドリイシ属被度、サンゴ種類別被度の総被度に占める比率を示す。パネル上端の数字はデータ数を表す。箱ひげ図は箱の両端（四分位数）を基点として四分位範囲の1.5倍の範囲外を除外値とし、下端から順に除外値を除く最小値、第一四分位数、中央値（黒い太線）、第三四分位数、除外値を除く最大値を表す。青丸は平均値、白丸は除外値を表す。サンゴの種類の色分けは青がミドリイシ属、オレンジがキクメイシ科、緑がアナサンゴモドキ属、赤がコモンサンゴ属、紫がハナヤサイサンゴ属、茶色がハマサンゴ属、ピンクがその他のサンゴを表す。

## 4. 考察

### 4.1 サンゴの生育に適する環境条件

那覇港の防波堤では港外側、港内側ともサンゴは浅い水深帯で被度が高くなった(図-3.1)。この一因としては、水深が浅いほどサンゴの生育に必要な光量が高いことが考えられる。体内に共生する褐虫藻の光合成産物に依存するサンゴにとって、光量はサンゴの成長速度を規定する主要な環境条件である(Chalker, 1981)。水深の増加に伴って光量が減衰し、サンゴの成長速度が低下すると考えられる(Pratchett et al., 2015)。特に防波堤の港内側は河川流入の影響や閉鎖性によって比較的濁りが強くなりやすい環境と考えられ、このような環境では光量がサンゴの分布を強く規定している可能性がある(Morgan et al., 2016)。また、港内側の主な着生基盤である直立壁面では基盤傾度が90°であり、水中での相対照度が基盤0°の面に対して減少するため、港内側のような光量が制限されている環境下でサンゴの生育に対する光量の影響が大きくなっていることが考えられる(山本ら, 2002)。他の要因としては浅い水深ほど波あたりが強く、水塊の流動が良くサンゴの生育に適する条件になっていることが考えられる。流動はサンゴにとって代謝の促進(Atkinson et al., 1994)、餌となるプランクトンなどの取り込みの促進(Sebens et al., 1998)、サンゴの成長の妨げとなりうる土砂や浮泥の除去(Rogers, 1990)など重要な役割を果たす。水深が浅い場所は高水温への暴露や台風による底質の破壊など攪乱が大きい環境でもあるが(Bridge et al., 2013)、那覇港の防波堤においてはこうしたデメリットよりもメリットが勝って浅い場所でサンゴの被度が高くなっていると考えられる。港外側では港内側より深い水深で被度が高かった。この理由としては、港外側は港内側よりも深い水深まで光が届きやすい環境であると考えられること、港外側の方がより波あたりが強く(年平均有義波高(および標準偏差)は港外側消波ブロックで $0.58 \pm 0.60$  m, 港内側直立壁面で $0.20 \pm 0.18$  m, 2018年6月から2019年7月にかけて浦添第一防波堤の港外側及び港内側のLWL-3 mの場所に設置した水圧式波高計による観測結果)、より深い場所まで水塊がよく流動していることが考えられる。

基盤傾度とサンゴ被度の関係については、基盤傾度15°~45°の範囲でサンゴ被度の中央値が概ね20%以上と高かった(図-3.2)。この理由としては、基盤が水平に近くなるほど、基盤上にサンゴの成長を阻害する砂泥が堆積しやすくなる一方、基盤傾度が増加すると基盤に当たる光量が減少するため、砂泥が堆積しにくく、かつ光量が確保できる基盤傾度でサンゴ被度が高くなっている可能性が

ある。

ATPの各壁面の光量とサンゴ被度の関係を見ると、St.1, St.2, St.3では、直立壁面である側面について光がよく当たる南向きの沖側面でサンゴ被度が高くなり、逆に北向きの岸側面ではサンゴ被度が低くなった(図-3.5)。ATP底面において岸沖方向でのサンゴ分布の偏りは見られないため、サンゴ被度の違いは主に壁面に当たる光量の違いに起因していると考えられる。ATP底面の無加工部は光量が沖側面と同等に高いにも関わらずサンゴ被度が岸側面と同程度に低いのは、側面と違って基盤が傾いていないため浮泥が堆積しやすく、サンゴの着生が抑制されていると考えられる。

目地部では目地から5 m, 10 m離れた地点よりもサンゴ被度が高くなった(図-3.6)。この結果から目地部はサンゴの着生に適した条件になっていると考えられる。目地部では港内外の海水の流動があり、例えば平良港の通水型ケーソンにおいて目地部の流速が目地から離れた直立部よりも相対的に速かったことが報告されている(石井ら, 2001)。サンゴの種類別に見ると目地部ではハナヤサイサンゴ属、ミドリイシ属、アナサンゴモドキ属の被度が目地から離れた地点よりも高かった( $p < 0.01$ )(棚谷ら, 2019)。これらのサンゴは天然のサンゴ礁において礁縁、礁嶺など波あたりや潮通しの良い環境に生息しており、こうしたサンゴにとって目地部が好適な環境になっていると考えられる。

総じて防波堤においては、浅い水深帯、光量が高い環境、砂泥が堆積しにくい環境、適度な流動がある環境がサンゴの着生に適していると考えられる。

### 4.2 サンゴの生育に配慮した防波堤構造の効果

#### (1) ATPの効果

ATPではSt.4,5においてサンゴ総被度が約16%となった(図-3.8)。St.4のサンゴ被度の平均値を元にATPの設置によるサンゴ面積の増加を試算すると、防波堤延長1 mあたり $0.95 \text{ m}^2$ となり、ATPを設置しない通常断面(Control)と比較した場合、港内側のサンゴ面積が約42%増加し(図-3.20)、防波堤上のサンゴ面積の増加に大きく寄与していることが示唆された。ATPの原型であるタカセガイ育成礁(Omori et al., 2007)と同様に、ATP底面の加工区では、ミドリイシ属を中心とした立体的な形状のサンゴが多く分布していた(図-3.9)。ATPの加工区においては、無加工区に比べてATP生態系の正味の石灰化速度(NEC)が高いことから(図-3.10)、サンゴ群集の成長速度が速く、防波堤上でサンゴが効率的に生育していることが伺われる。加工区においてNECが高い理由としては、加工区で

無加工区よりも成長速度が速いミドリイシ属 (Pratchett et al., 2015) が多いこと (図-3.7, 図-3.8) が要因として考えられる。また, ATP の FRP グレーチング加工区においては, 魚類の個体数が多かった (図-3.12)。その一因としてはミドリイシ属など枝分かれするサンゴが有する立体的な骨格の形状が基盤の複雑さを高めることで魚類の避難所 (shelter) となり, 魚類の個体数が高まっていることが考えられる (Agudo-Adriani et al., 2016; Graham and Nash, 2013)。ATP においては漁獲の対象となっているヒメジャコを含むシャコガイ類や, ナマコ, ウニ類などの大型底生生物も確認された (図-3.13, 図-3.14)。このように生態系機能が高いミドリイシ属が多く着生していること, サンゴ以外にも漁獲対象種を含む生物が生息していることを考えると, ATP の設置によってもたらされる生態系サービスによる便益は特に高いことが期待される。

ATP のサンゴ着生効果が高かった理由としては, ATP の設置に伴い (1) サンゴの着生に適した浅場の面積を拡大したこと, (2) ATP の底面の表面加工の効果, (3) 大潮の干潮時のサンゴ (特にミドリイシ属) の一斉産卵後にタイドプール内の水が滞留する効果が考えられる。

那覇港の防波堤の港内側では水深が浅い場所でサンゴ被度が高く, 水深の増加に伴ってサンゴ被度が減少する (図-3.1)。ATP が設置されている LWL0 m 以上の場所は大潮の干潮時に水面から露出してしまうため, 通常はサンゴが生息できない環境であるが, ATP では潮溜まりの構造を作ることによって干潮時でも干上がらず, サンゴが生育可能な環境となっている。ATP の設置によってサンゴ被度が高くなる浅場面積を拡大することに成功している。

ATP では底面に施された表面加工もサンゴの被度を高める効果があると考えられる。FRP グレーチングや凹凸加工には単位底面あたりの表面積を拡大し, サンゴが着生可能な面積を拡大する効果があると考えられる。また, FRP グレーチングや凹凸加工によって, 底面からの基盤が底上げされることでサンゴが堆積物の影響を受けにくくなり, サンゴの加入やその後の成長を高める効果もあると考えられる。堆積物や堆積物をトラップする藻類によるサンゴの窒息は, サンゴ幼生の加入や稚サンゴの生存に影響する主な要因であり, 堆積物に覆われた表面ではサンゴの着底はほぼゼロに近くなる (Fabricius, 2005)。懸濁物質の濃度が高くなるとサンゴ幼生の生存率と定着率は低下し (Gilmour, 1999), 堆積物耐性が低いサンゴの種類では, 懸濁物質濃度が増加すると成長速度が低下する (Rogers, 1990)。さらに, グレーチング構造は魚類からの稚サンゴの捕食を妨げている可能性が指摘されている

(Suzuki et al., 2011)。天然のサンゴ礁でも微小な窪地 (crevice) において幼少期のサンゴが多く生息しており, こうした場所が藻食魚からの有効な避難場所になっている可能性が示唆されている (Brandl et al., 2014)。既設の生物共生型防波堤では ATP の加工区的面積は底面全体の 34%程度にとどまっていることから, 加工区的面積を拡大することによって, ATP のサンゴ着生効果を高めることが期待できる。また, サンゴ (特にミドリイシ属) の一斉産卵後の干潮時にタイドプール内の水が滞留し, サンゴの幼生がタイドプール内にトラップされ, 幼生の着底を促進する効果も期待できる (Omori et al., 2007)。

ATP の凹凸加工区のみドリイシ属の被度は, ATP の設置水深によって差が見られた (図-3.8)。このことから, 防波堤のサンゴ面積を高めるためには, サンゴ生育に適する水深を考慮して構造物を設置し, サンゴの適性水深を広く確保することが重要であることが示唆された。St. 2 で St. 5 よりもミドリイシ属の被度が低くなった理由としては, St. 2 の ATP の天端水深が LWL +1.0 m と St. 5 の設置水深より 30 cm 浅いため, 波あたりや高水温, 降雨時の表層の塩分低下などの攪乱の頻度が St. 5 よりも高いことが考えられる。ATP ではサンゴが生息していない基盤上は芝状藻類を主とする藻類が繁茂しており, St. 2 の ATP では St. 5 よりサンゴが少ない分, 藻類が壁面に占める面積が大きくなっている。攪乱が多い環境下において成長速度が速く, 入植が速い芝状藻類が, 波あたりの強い環境下でのサンゴの破壊や, 高水温によるサンゴの白化後に新たに利用可能となった底質を占拠し, 底質をめぐる競争においてサンゴが不利になっていることが考えられる (Diaz-Pulido and McCook, 2002; Williams et al., 2013)。

## (2) 凹凸加工消波ブロックのサンゴ着生効果

凹凸加工消波ブロックでは凹凸加工区で無加工区よりもサンゴ被度が高くなった (図-3.17)。消波ブロックの凹凸加工区では施工後 6 年でサンゴ被度が無加工区の 2 倍以上となることから (図-3.18), 凹凸加工消波ブロックはサンゴ群集の初期の成長速度を高める効果があると考えられる。凹凸加工消波ブロックでは, 施工直後から 5-6 年後までサンゴの群体数が無加工の消波ブロックより多く, 凹凸加工がサンゴの初期生存率を高めている可能性がある (三宅ら, 2006; Maekouchi et al., 2008)。消波ブロックの 10 mm 凹凸加工区では, 無加工区に比べてサンゴ被度の平均値が約 2 倍になり (図-3.17), これによって凹凸加工消波ブロックの平均的なサンゴ被度は無加工の消波ブロックの 1.1 倍となり, 港外側のサンゴ面積が防波堤延長 1 m あたり 0.39 m<sup>2</sup> 増加する試算結果となった (図-3.20)。

延長 1 m, 水深 1 m あたりの加工区の面積は  $0.09 \text{ m}^2$  であり, 防波堤の上面勾配と表面の凹凸度 (Graham and Nash, 2013) から試算した港外側に露出するブロックの表面積  $2.30 \text{ m}^2$  のわずか 4% 程度となっている. 加工区的面積を広げることで, より高いサンゴ着生効果が期待できる.

### (3) 凹凸加工パネル, 目地通水部のサンゴ着生効果

直立部の凹凸加工パネルのサンゴ着生効果は水深により違いが見られ, LWL-2~3 m では無加工区よりサンゴ被度が高まったが, LWL-4~5 m 以深では無加工区よりもサンゴ被度が低下した (図-3.15, 図-3.16). 直立部は壁面が垂直であるために基盤上に砂泥が溜まりにくいと考えられることから, 表面加工の効果としては, 表面積の拡大や基盤上に加入したサンゴの初期生存率の向上などが考えられる. 凹凸加工パネルの設置水深の深い場合, 凹凸加工の溝やパネル同士の隙間で特に光量が低下し, サンゴの着生や成長が抑制されている可能性がある.

目地部では目地幅 1 m 前後でサンゴ被度が高くなった (図-3.19). 浦添第一防波堤の通水型ケーソン模型を用いて行われた水理模型実験では, 目地幅 1 m 前後まで目地幅が広がるほど港内側出口流速が速くなった (棚谷ら, 2019). サンゴは適度な流れがある環境で成長が促進されるため (Nakamura, 2010), 通水型ケーソンがサンゴの着生を促進している可能性がある.

### (4) 生物共生型防波堤の費用対サンゴ着生効果

生物共生型防波堤 PB<sub>deep</sub> では Control と比べて費用対サンゴ着生効果が 1 割増加した (表-3.1). PB<sub>deep</sub> においては, 通常断面と比較してサンゴ面積が 2 割増加し, ATP の設置によるサンゴ面積の増加がそのうちの 4 割を占めており最も大きかった (図-3.20). 生物共生型防波堤における整備費用の内訳を見ると, 港内側のマウンドの嵩上げ費用が生物共生型防波堤の費用増加の大半を占めており, ATP 設置に伴う整備費用の増加は小さかった (表-3.2). したがって, ATP の設置は防波堤のサンゴ着生効果を高める上で費用対効果の高い手法であると言える. ここで仮想的な断面として, 天端高 LWL +0.7 m の ATP のみを設けた Control + ATP (図-4.1) を考える. Control + ATP の延長 1 m あたりの整備コストは, 港内側, 港外側は Control と同一とし, ケーソン本体, 上部工, 堤体下の基礎工, ATP (FRP グレーチング加工) の設置費用については ATP の天端高が若干異なるものの PB<sub>shallow</sub> とほぼ同一と考え, 断面全体の合計金額は 25,492 千円と推定される. PB<sub>shallow</sub> において嵩上げマウンドは防波堤の安定性には寄与していないため, Control+ATP は構造的に安定で

ある. Control + ATP の延長 1 m あたりのサンゴ面積は, Control のサンゴ面積 ( $10.15 \text{ m}^2$ ) に PB<sub>deep</sub> の ATP のサンゴ面積 ( $0.95 \text{ m}^2$ ) を加えた  $11.10 \text{ m}^2$  と推定される. ここで各断面の生物共生手法の費用対サンゴ着生効果を生物共生型防波堤のサンゴ面積の増分を生物共生型防波堤の整備コストの増分で除したものとして考えると, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub>, Control+ATP でそれぞれ  $6.2, 8.7, 110.5 \text{ cm}^2 / 1,000 \text{ 円}$  となり, Control+ATP において最も費用対効果が高くなった. 天端高 LWL +0.7 m の ATP の表面積 (延長 1 m あたり  $6.01 \text{ m}^2$ ) を考慮すると, ATP の設置によりサンゴ被度 16% の基盤増加が  $698.8 \text{ cm}^2 / 1,000 \text{ 円}$  で実現できることになる. この費用対効果は移植等によるサンゴ礁の再生の費用対効果 (中央値  $165,697 \text{ 2010 US\$ per ha}$ , 日本円換算で  $608.3 \text{ cm}^2 / 1,000 \text{ 円}$ , Bayraktarov et al., 2016) に匹敵する. Bayraktarov et al., 2016 では, サンゴ礁再生のためのサンゴ群体の移植密度が  $1 \text{ m}^2$  あたり 4-5 群体程度が想定されており, ATP でのサンゴ群体の密度が同等以上であること (天端高 LWL +0.7 m, FRP グレーチング加工区では ATP の底面と側面に分布する全てのサンゴ群体の密度が  $1 \text{ m}^2$  あたり  $25.6 \pm 0.7$  群体, ミドリイシ属の群体密度が  $1 \text{ m}^2$  あたり  $4.1 \pm 0.7$  群体) を考慮すると, ATP の設置はサンゴ生息場の再生手法としても費用対効果の高い手法であると言える.

### (5) 費用対サンゴ着生効果の高い防波堤断面の決定方法

試算対象とした 3 つの防波堤断面の中で, 最も費用対サンゴ着生効果が高いのは PB<sub>deep</sub> となった (表-3.1). 予算の上限が無い場合は, 防波堤の全整備区間にわたって費用対効果が最も大きい PB<sub>deep</sub> を整備することで最大のサンゴ面積を実現できる. しかしながら, 実際のインフラ整備にあたっては予算額が決まっていることも多いと考えられる. その場合には, 決められた予算においてサンゴ面積が最大化する断面の組み合わせを検討することが重要である (図-4.2). ここでは既設の Control, PB<sub>shallow</sub>, PB<sub>deep</sub> に, 仮想的な断面として, 天端高 LWL +0.7 m の ATP のみを設けた Control + ATP を加えた組み合わせを考える. Control + ATP の費用対効果は  $4.35 \text{ cm}^2 / 1,000 \text{ 円}$  となり, Control, PB<sub>shallow</sub> に比べて高く, PB<sub>deep</sub> に比べて低い値となった. この 4 つの断面を想定すると, 予算 25,406 千円 ~ 25,492 千円では Control と Control + ATP の組み合わせでサンゴ面積が最大化し, 予算 25,492 千円 ~ 28,016 千円では Control + ATP と PB<sub>deep</sub> の組み合わせでサンゴ面積が最大化する. 実際にかけられるコストに応じて, 生物共生型断面を採用する割合を調整することで, 予算内に収まるような計画が立案できる.

#### 4.3 防波堤と天然礁のサンゴの着生状況の比較

那覇港の天然礁では白化前に 40%程度あったサンゴ総被度が 1998 年白化以降大きく減少し、2018 年現在、総被度は 10%程度になっている（図-3.25）。とくに 1998 年前後でミドリイシ属の被度が大幅に低下し、その後回復していない。一方防波堤では、1998 年の白化以降もミドリイシ属を主体とするサンゴの被度が増加し、サンゴ総被度が白化前の水準（総被度 20%程度）まで回復しており、ミドリイシ属の比率も白化前と同等の 40%程度となっている（図-3.24）。したがって那覇港の防波堤は 1998 年の大規模白化以降に天然礁で失われたサンゴ群集を維持していると言える。防波堤に多く分布しているミドリイシ属は成長が旺盛で、魚類の蟄集効果を有するなど生態系機能が高いことから、防波堤は周囲の天然礁で失われた生態系機能を維持しているとも考えられる。

1998 年白化直後の 2000 年には天然礁、防波堤ともサンゴ総被度が低くなっていることから、防波堤において 2018 年現在も白化前の被度が維持されているのは、防波堤のサンゴ群集が白化しにくかったためではなく、白化後に群集が回復したためと考えられる。防波堤では 2000 年にはサンゴ総被度の中央値が 0%に近い状態であったが、2004 年には 20%になっており、1998 年の白化後約 6 年で白化前の被度にまで回復している。防波堤港外側では LWL-8.0 m 以浅でミドリイシ属の比率が概ね 40%以上と主体的であり、この水深帯で被度が高かった（図-3.23）。したがって防波堤においては、LWL-8.0 m 以浅の比較的浅い水深帯においてミドリイシ属を主体としたサンゴの旺盛な成長によってサンゴ被度が高い水準で維持されていると考えられる。沖縄本島沿岸では陸域からの赤土が流入し濁りが生じた天然のサンゴ礁においては白化後にミドリイシ属の被度が回復せず、サンゴ総被度も大きく減少している（Hongo and Yamano, 2013）。防波堤港外側は陸域からの土砂の流入などによる濁りの影響を受けにくく、ミドリイシ属にとって好適な環境が維持されている可能性がある。また、防波堤では天然礁よりも深い水深（LWL-8.0 m 程度）までミドリイシ属の比率が高くなっている。沖合に設置された防波堤では、天然礁よりも透明度が高く、より深い水深まで光量が高くなることや、那覇防波堤や浦添第一防波堤など水深 20~30m の海底から設置されている防波堤では、天然礁よりも急勾配で海底から構造物が立ち上がっており、港外に面する場所では同じ水深でも天然礁よりも波あたりが強く、ミドリイシ属などのサンゴにとって好適な環境になっている可能性がある。

#### 4.4 気候変動に対するサンゴ礁生態系再生手法

那覇港の防波堤では白化後約 6 年でサンゴ被度が 20%程度と白化前の水準まで回復した。2000 年代以降大規模なサンゴの白化は約 6 年の周期で起こっているが（Hughes et al., 2018a）、那覇港の防波堤のサンゴ群集はこうした繰り返し起こる白化の周期に対応できる可能性がある。今後の温暖化の進行に伴い、白化の周期がより短くなることも予想されるが、部材表面の加工などの工夫によって、施工後 5-6 年後のサンゴの被度を 2 倍程度高めることも可能であり（図-3.9, 図-3.17, 図-3.18）、こうした工夫によって白化の周期に追いついて群集を回復させることができる可能性がある。サンゴ礁生態系の再生に向けて温暖化の緩和に向けた取り組みは不可欠であるが（Morrison et al., 2020; Duarte et al., 2020）、温暖化が進行し、大規模な白化によるサンゴ群集の死滅が深刻化する中で（Hughes et al., 2018b）、たとえ小規模であっても健全なサンゴ群集のある場所が維持されることは、他所へのサンゴの幼生の供給や高水温への適応のもととなる遺伝子の供給源としても重要である（Darling et al., 2018）。

表-4.1 に防波堤などの港湾構造物を用いたサンゴ礁生態系再生の長所と短所（今後の課題）をまとめた。サンゴ礁生態系の再生手法として一般的な天然のサンゴ礁へのサンゴの移植と長所・短所を比較した。天然のサンゴ礁へのサンゴの移植では、無性生殖もしくは有性生殖によって得られたサンゴ片を中間育成して移植可能なサイズまで育ててから海域に移植する。この手法は天然のサンゴ礁生態系そのものの再生に直接寄与しうが、移植するサンゴの確保、中間育成、植え付け作業に多額な費用がかかるため、これまで行われてきた記録に残っている移植の実施面積の中央値は 500 m<sup>2</sup>、最大で約 1 ha 規模となっている（Boström-Einarsson et al., 2020）。また現状では移植後のサンゴが基盤に定着しないまま流出してしまうなど、移植後のサンゴの生存率の向上に向けた課題が多く残されている（大森, 2016）。一方港湾構造物を用いた生息場の創造は、天然のサンゴ礁生態系そのものの再生ではないが、構造物の設置水深の調整や表面加工などの工夫によりサンゴの生育環境を改良することができる。サンゴの生育に適した環境が整えば自然加入によりサンゴが増殖するため、サンゴの確保や育成、植え付けの費用はかからない。一方、港内静穏度の確保などを第一目的として整備される港湾構造物は、生物の着生を主目的として構造を自由にデザインすることは許されない。生物共生型港湾構造物も港湾構造物に生物生息機能を付加するものであり、港湾構造物の本来の機能を維持することが前提と

なる。生物共生型港湾構造物の整備にあたっては、構造物の施工性、安定性、経済性といった構造上の前提条件の他、船舶の航行・接岸等による利用上の制約、上位・関連計画、自然条件（周辺海域の流況・波浪等の物理条件や水質条件及び生物の生息状況等）を把握した上で、当該地域の環境に応じた効果的な構造の検討を行う必要がある（国土交通省港湾局, 2018b）。特に生物の生息にとって重要な浅場を確保するためにマウンドの嵩上げや基盤の傾斜を緩めるなどすると、防波堤断面が膨らみ経済性が損なわれる恐れがある。解決策としては、防波堤の粘り強い化など構造物としての安定性を高めるための施工や構造物の耐震補強や劣化改修に合わせて生物生息場を造成することや、ATP のような比較的成本の低い浅場造成技術の開発に加えて、生物共生機能の向上による便益の評価（Okada et al., 2019）や、そうした便益を防波堤整備の便益として計上できるような仕組みづくりが望まれる。港湾構造物を用いた生息場の新たな創造にあたっては、港湾構造物整備によって失われる整備箇所の生態系や周辺環境への影

響評価も不可欠である。こうした評価を行った上で、既存の生態系の再生が見込める場合は、既存の生態系に構成や機能が異なる新たな生態系を組み合わせたハイブリッド型の生態系を、既存の生態系の再生が見込めない場合には全く新しい生態系を新たに創造される基盤における再生のゴールとして設定し（Van Oppen et al., 2017; Schläppy and Hobbs, 2019）、防波堤のデザインに反映することが重要である。LWL-20 m の海底上に整備された浦添第一防波堤の場合、生物共生型防波堤の整備によって新たに創出される基盤の面積は延長 1 m あたり約 100 m<sup>2</sup> となり（表-3.1）、数百～数千 m にわたって防波堤を延長する場合、その面積は数～数十 ha となる。この基盤を新たな生物の生息場として捉えた場合、その生物生息機能を向上させるための取り組みは周辺海域のサンゴ礁生態系の再生にとって極めて重要である。

表-4.1 港湾構造物を用いた生息場の創造と天然のサンゴ礁へのサンゴの移植の生態系再生手法としての長所と短所

| サンゴ礁生態系再生手法         | 長所                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 短所                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) 港湾構造物を用いた生息場の創造 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・構造物の設置水深の調整や表面加工などの工夫により、サンゴの生育に適した環境を整備したり生育環境を改良したりすることができる。</li> <li>・主波向に面する防波堤など、波あたりの良いサンゴの生育に適した環境を確保できる。</li> <li>・アクセスが良く、観光、漁業などの利用可能性が高く、便益を高めやすい。モニタリングも実施しやすい。</li> <li>・サンゴは自然加入により生育するため、多様なサンゴの加入が期待でき、移植サンゴの確保や中間育成、植え付けにかかるコストは不要である。</li> <li>・防波堤の整備によって数～数十 ha 規模の新たな基盤が創出される。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・港湾構造物としての施工性、経済性、安定性を考慮する必要がある。</li> <li>・港湾構造物の整備による整備箇所の既存の生態系の損失、工事による周辺環境への影響を考慮する必要がある。</li> <li>・天然のサンゴ礁より単純な構造であるため、天然のサンゴ礁生態系の多様性を完全に復元することは困難な可能性がある。</li> </ul> |
| (2) 天然サンゴ礁へのサンゴの移植  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・サンゴ礁生態系そのものの再生に直接寄与しうる。</li> <li>・有性生殖移植の場合、天然に存在するサンゴを傷つけない。</li> <li>・遺伝子操作などにより高温耐性のサンゴを創出し、移植することも可能である。</li> </ul>                                                                                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・移植後のサンゴの生存率が低い場合がある。</li> <li>・移植の適地を選定することが困難な場合がある。</li> <li>・移植サンゴの確保、中間育成、植え付け作業のコストが高く、大規模な面積への移植が困難。</li> </ul>                                                     |

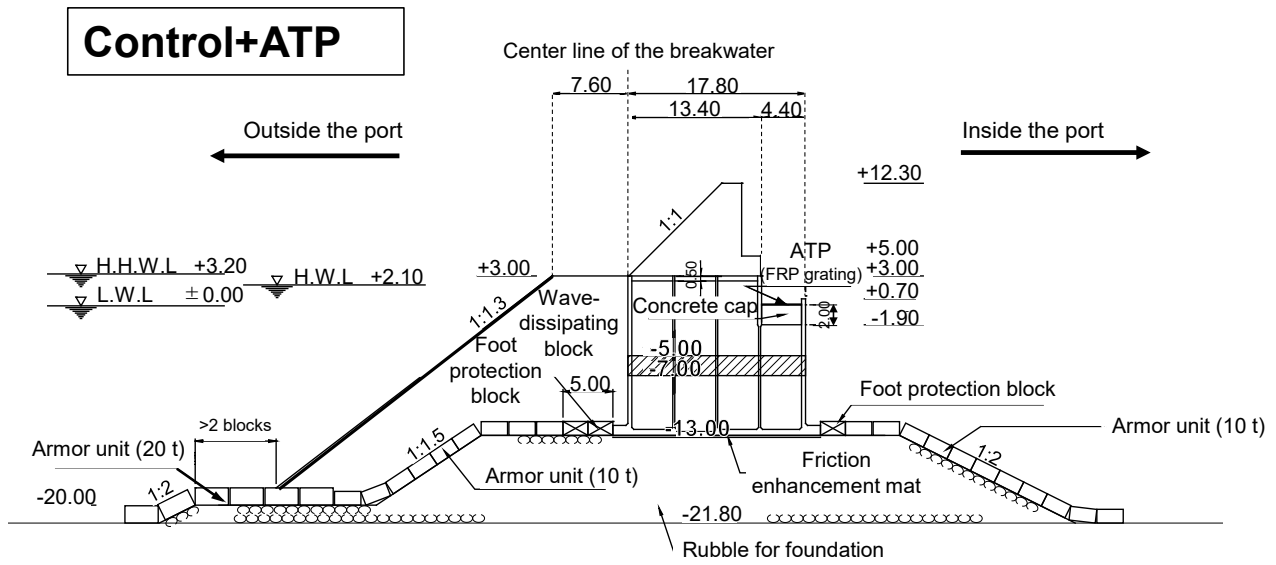


図-4.1 ATP のみを設置した生物共生型防波堤（Control+ATP）の断面図

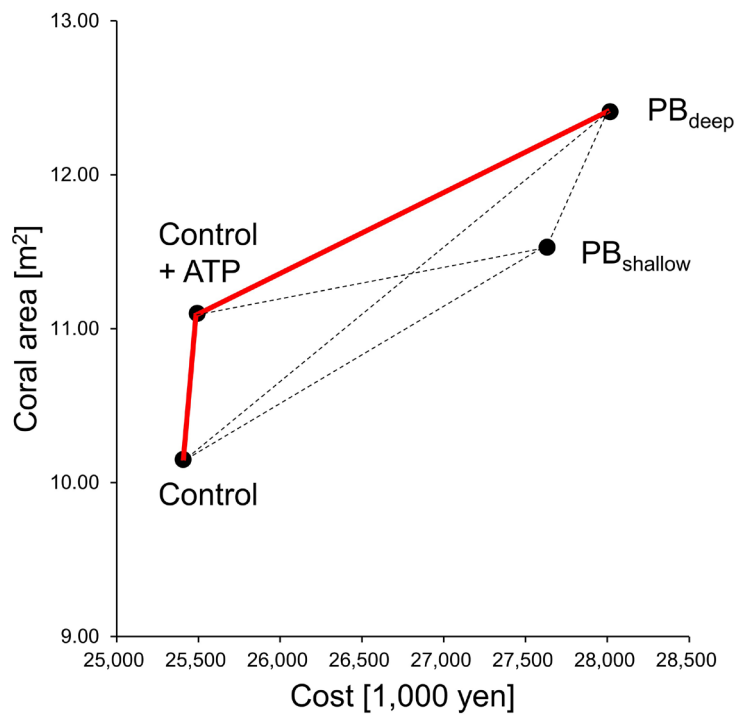


図-4.2 防波堤延長 1 m あたりの整備コストとサンゴ面積の関係

点線はとりうる断面の組み合わせ、直線は決められた予算に対して最もサンゴ面積が大きくなる断面の組み合わせを示す。予算 25,406 千円～25,492 千円では Control と Control + ATP の組み合わせでサンゴ面積が最大化し、予算 25,492 千円～28,016 千円では Control + ATP と PB<sub>deep</sub> の組み合わせでサンゴ面積が最大化する。

## 5. あとがき

本研究では沖縄県那覇港におけるサンゴの着生状況とこれまで行われてきた環境への介入の効果を調査し、人工構造物を用いた新たな生息場の創造の気候変動に対するサンゴ礁生態系の再生手段としての有効性を検証した。沖縄総合事務局による那覇港の防波堤と周囲の天然礁における平成元年度から平成 30 年度にかけての過去 30 年分のサンゴに関する調査報告書を整理し、サンゴの着生状況と周辺的环境条件などに関する過去データを整理した。さらに過去に調査が実施されていなかった、サンゴの着生に配慮した生物共生型防波堤において現地調査を実施し、サンゴの着生状況、成長速度、環境条件、魚類や大型底生生物の個体数などを調査した。これらのデータを用いて、サンゴの生育に適する環境条件、サンゴ生育に配慮した防波堤の部材の効果を調べ、防波堤と天然礁のサンゴの着生状況を比較した。本研究の主要な成果は以下のとおりである。

- ・サンゴの生育に適する環境条件：防波堤においては浅い水深帯、光量が高い環境、砂泥が堆積しにくい環境、適度な流動がある環境でサンゴ被度が高くなった。
- ・サンゴ生育に配慮した防波堤構造の効果：生物共生型防波堤では、サンゴの生育に適する浅場に人工タイドプール（ATP）を設け、浅場面積を拡大したことにより、防波堤延長 1 m あたりサンゴ面積が約 1 m<sup>2</sup> 増加し、港内側のサンゴ面積が約 40% 増加した。ATP の表面に凹凸加工や FRP グレーチング加工を施した加工区では無加工区に比べてサンゴ被度が高く、特に生態系機能が高いミドリイシ属の被度が高かった。表面加工を施した ATP ではサンゴ群集の成長速度が速く、魚類の種類数、個体数も多かった。ATP では生態系機能上重要なミドリイシ属が多く、漁獲対象となるシャコガイなどの底生生物も見られることから、ATP のサンゴ礁生態系による便益は高いことが示唆された。表面に凹凸加工を施した港外側の消波ブロックでは、施工後 6 年の凹凸加工区のサンゴ被度が 45% と無加工区の約 2 倍になった。生物共生型防波堤の費用対サンゴ着生効果を試算すると通常の防波堤より 1 割増加した。特に ATP の設置による費用対サンゴ着生効果が高く、移植によるサンゴ礁再生手法の費用対効果に匹敵することから、ATP はサンゴ生息場の再生手法としても有効であることが明らかになった。
- ・防波堤と天然礁のサンゴ着生状況の比較：過去 30 年間の那覇港の防波堤と周辺の天然礁のサンゴ被度を比較

した。人工構造物では 1998 年の高水温によるサンゴの白化によりサンゴ被度が大きく低下したものの、白化後約 6 年程度で元の被度まで回復し、2018 年は被度 20% 程度と白化前と同等の被度を維持していた。一方天然礁では白化前は 40% 程度あったサンゴ被度が 1998 年の白化で大きく減少し、その後緩やかな回復傾向にあるものの 2018 年は被度 10% 程度と人工構造物より被度が低下していた。人工構造物では 1998 年以降ミドリイシ属の被度が増加し、サンゴ被度が回復したが、天然礁では 1998 年以降ミドリイシ属の被度があまり回復しなかった。

上記の成果をとりまとめると、浅場面積の拡大や表面加工などサンゴの生育に適する環境条件に配慮した防波堤構造により、サンゴ及びサンゴ礁生態系機能が向上することが明らかになった。サンゴ被度の回復速度（～6 年で被度 20～40%）は、近年のサンゴの大規模白化の周期（～6 年）に対応しうることが示された。また、1998 年の大規模白化以降、防波堤は周囲の天然礁で失われた生態系機能（特に生態系機能の高いミドリイシ属の被度）を維持していることが明らかになり、サンゴ礁生態系の再生手段としての有効性が示された。これらの結果から防波堤による新たな生息場の創造は、気候変動に対するサンゴ礁生態系の再生手段として有効であると結論付けられる。今後の課題として、防波堤が天然礁よりも攪乱後のサンゴ群集の回復速度が速い理由の検証や、防波堤の費用対サンゴ着生効果に基づき、サンゴ着生による便益を評価し、生物共生型防波堤の費用便益分析を行うことが挙げられる。

（2020年11月2日受付）

## 謝辞

本研究の実施にあたっては金城信之氏、具志良太氏（研究実施時）をはじめ内閣府沖縄総合事務局から多大なるご協力をいただいた。現地調査、過去データの整理、生物共生型防波堤の費用検討にあたっては岩村俊平氏、岡田亘氏、安田将人氏にご協力いただいた。試料分析、データ解析にあたっては嶋田光留氏、牧野諒子氏にご協力いただいた。当所の鈴木高二朗氏、鶴田修己氏には本稿に対して有益なご助言をいただいた。ここに記して深く謝意を表します。

## 参考文献

石井正樹，前幸地紀和，大村誠，山本秀一，高橋由浩，田村圭一（2001）：平良港におけるサンゴ礁群集に配慮

- した環境修復技術. 海岸工学論文集, 48, 1301-1305.
- 岩上淳一, 宮井真一郎, 栗田一昭, 尾崎幸男, 山本秀一, 高橋由浩 (1995): サンゴの人工構造物への着生状況-2, 海岸工学論文集, 42, 1206-1210.
- 大森信 (2016): 目標は植込み 3 年後の生存率 40%以上-サンゴ移植の現状および課題と方向-. みどりいし, 27, 1-4.
- 環境省 (2017): 西表石垣国立公園 石西礁湖のサンゴ白化現象の調査結果について. 平成 29 年 1 月 10 日報道発表資料, <http://www.env.go.jp/press/103439.html>.
- 国土交通省港湾局 (2014): 生物共生型港湾構造物の整備・維持管理に関するガイドライン, <https://www.mlit.go.jp/common/001048849.pdf>.
- 国土交通省港湾局 (2018a): 「港湾の施設の技術上の基準」を改訂, 平成 30 年 2 月 2 日報道発表資料, <https://www.mlit.go.jp/common/001220162.pdf>.
- 国土交通省港湾局 (2018b): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会.
- 棚谷灯子, 金城信之, 岩村俊平, 青山宗平, 長谷川巖, 鈴木高二朗, 桑江朝比呂 (2019): 防波堤におけるサンゴの着生に対するケーソン目地部の効果. 土木学会論文集 B2(海岸工学), 75 (2), I\_1147-I\_1152.
- 西平守孝・Veron, J. E. (1995): 日本の造礁サンゴ類, 海游舎, 439 pp.
- 三宅光一, 甲斐広文, 宮里高広, 國吉啓太, 山本秀一, 田村圭一, 岩村俊平 (2006): 人工構造物の表面加工によるサンゴ群集着生促進効果の評価. 海岸工学論文集, 53, 1106-1110.
- 森田晉, 田淵郁男, 前原弘海, 進明男, 児玉理彦, 山本秀一 (1992): サンゴの人工構造物への着生状況, 海岸工学論文集, 39, 1000-1005.
- 山本秀一, 高橋由浩, 住田公資, 林輝幸, 杉浦則夫, 前川孝昭 (2002): 人工構造物におけるサンゴ群集成長過程の解析. 海岸工学論文集, 49, 1186-1190.
- 吉見昌宏, 与那覇健次, 片岡真二, 山本秀一, 高橋由浩, 田村圭一 (1998): サンゴの人工構造物への着生状況-3, 海岸工学論文集, 45, 1111-1115.
- Agudo-Adriani, E. A., J. Cappelletto, F. Cavada-Blanco, and A. Croquer (2016): Colony geometry and structural complexity of the endangered species *Acropora cervicornis* partly explains the structure of their associated fish assemblage. PeerJ, 4: e1861.
- Ainsworth, T. D., Hurd, C. L., Gates, R. D., and Boyd, P. W. (2020): How do we overcome abrupt degradation of marine ecosystems and meet the challenge of heat waves and climate extremes?. Global Change Biology, 26(2), 343-354.
- Anthony, K., Bay, L. K., Costanza, R., Firn, J., Gunn, J., Harrison, P., Heyward, A., Lundgren, P., Mead, D., Moore, T., Mumby, P. J., van Oppen, M. J. H., Robertson, J., Runge, M. C., Suggett, D. J., Schaffelke, B., Wachenfeld, D. and Walshe, T. (2017): New interventions are needed to save coral reefs. Nature Ecology & Evolution, 1(10), 1420-1422.
- Atkinson, M. J., Kotler, E., and Newton, P. (1994): Effects of water velocity on respiration, calcification, and ammonium uptake of a *Porites compressa* community. Pacific Science, 48(3), 296-303.
- Bayraktarov, E., M. I. Saunders, S. Abdullah, M. Mills, J. Beher, H. P. Possingham, P. J. Mumby, and C. E. Lovelock (2016): The cost and feasibility of marine coastal restoration. Ecological Applications, 26(4): 1055-1074.
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S. C. A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P. J., Vardi, T. and McLeod, I. M. (2020): Coral restoration—A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. PloS one, 15(1), e0226631.
- Brandl, S. J., A. S. Hoey, and D. R. Bellwood (2014): Microtopography mediates interactions between corals, algae, and herbivorous fishes on coral reefs. Coral Reefs, 33(2): 421-430.
- Bridge, T. C., Hughes, T. P., Guinotte, J. M., and Bongaerts, P. (2013): Call to protect all coral reefs. Nature Climate Change, 3(6), 528-530.
- Cesar, H. S., and P. van Beukering (2004): Economic valuation of the coral reefs of Hawai'i. Pacific Science, 58(2), 231-242.
- Chalker, B. E. (1981): Simulating light-saturation curves for photosynthesis and calcification by reef building corals. Marine Biology, 63, 135-141.
- Darling, E. S., and Côté, I. M. (2018): Seeking resilience in marine ecosystems. Science, 359(6379), 986-987.
- De Groot, R., L. Brander, S. Van Der Ploeg, R. Costanza, F. Bernard, L. Braat, M. Christie, N. Crossman, A. Ghermandi, L. Hein, S. Hussain, P. Kumar, A. McVittie, R. Portela, L. C. Rodriguez, P. ten Brink, and P. van Beukering. (2012): Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. Ecosystem services, 1(1), 50-61.

- Diaz-Pulido, G. and L. J. McCook (2002): The fate of bleached corals: patterns and dynamics of algal recruitment. *Marine Ecology Progress Series*, 232, 115-128.
- Duarte, C.M., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G. L., Castilla, J. C., Gattuso, J-P, Fulweiler, R. W., Hughes, T. P., Knowlton, N., Lovelock, C. E., Lotze, H. K., Predragovic, M., Poloczanska, E., Roberts, C. and Worm, B. (2020): Rebuilding marine life. *Nature*, 580, 39–51.
- Fabricius, K. E. (2005): Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine pollution bulletin*, 50(2), 125-146.
- Fadli, N., Campbell, S. J., Ferguson, K., Keyse, J., Rudi, E., Riedel, A., and Baird, A. H. (2012): The role of habitat creation in coral reef conservation: a case study from Aceh, Indonesia. *Oryx*, 46(4), 501-507.
- Ferrario F., M. W. Beck, C. D. Storlazzi, F. Micheli, C. C. Shepard., and L. Airoidi (2014): The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nature Communications*, 5, 3794.
- Fox, H. E. (2005): Rapid coral growth on reef rehabilitation treatments in Komodo National Park, Indonesia. *Coral Reefs*, 24(2), 263.
- Gilmour, J. (1999): Experimental investigation into the effects of suspended sediment on fertilisation, larval survival and settlement in a scleractinian coral. *Marine Biology*, 135(3), 451-462.
- Grafeld, S., K. L. Oleson, L. Teneva, and J. N. Kittinger (2017): Follow that fish: Uncovering the hidden blue economy in coral reef fisheries. *PloS one*, 12(8), e0182104.
- Graham, N. A. J., and K. L. Nash (2013): The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral reefs*, 32(2), 315-326.
- Hata, H., Kudo, S., Yamano, H., Kurano, N., & Kayanne, H. (2002): Organic carbon flux in Shiraho coral reef (Ishigaki Island, Japan). *Marine ecology progress series*, 232, 129-140.
- Harris, D. L., A. Rovere, E. Casella, H. Power, R. Canavesio, A. Collin, A. Pomeroy, J. M. Webster, and V. Parravicini. (2018): Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Science advances*, 4(2), eaao4350.
- Hongo, C., and Yamano, H. (2013): Species-specific responses of corals to bleaching events on anthropogenically turbid reefs on Okinawa Island, Japan, over a 15-year period (1995–2009). *PloS one*, 8(4), e60952.
- Howells, E. J., Berkelmans, R., van Oppen, M. J., Willis, B. L., and Bay, L. K. (2013): Historical thermal regimes define limits to coral acclimatization. *Ecology*, 94(5), 1078-1088.
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., Babcock, R.C., Beger, M., Bellwood, D.R., Berkelmans, R., Bridge T. C., Butler, I. R., Byrne, M., Cantin, N. E., Comeau, S., Connolly, S. R., Cumming, G. S., Dalton, S. J., Diaz-Pulido, G., Eakin, C. M., Figueira, W. F., Gilmour, J. P., Harrison, H. B., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hobbs, J. A., Hoogenboom, M. O., Kennedy, E. V., Kuo, C. Y., Lough, J. M., Lowe, R. J., Liu, G., McCulloch, M. T., Malcolm, H. A., McWilliam, M. J., Pandolfi, J. M., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Schoepf, V., Simpson, T., Skirving, W. J., Sommer, B., Torda, G., Wachenfeld, D. R., Willis, B. L. & Wilson, S. K. (2017a). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373.
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H. and Scheffer, M. (2017b): Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(7656), 82-90.
- Hughes, T. P., Anderson, K. D., Connolly, S. R., Heron, S. F., Kerry, J. T., Lough, J. M., Baird, A. H., Baum, J., K., Berumen, M. L., Bridge, T. C., Claar, D. C., Eakin, C. M., Gilmour, J. P., Graham, N. A. J., Harrison, H., Hobbs, J-P. A., Hoey, A. S., Hoogenboom, M., Lowe, R. J., McCulloch, M. T., Pandolfi, J. M., Pratchett, M., Schoepf, V., Torda, G., and Wilson, S. K. (2018a) Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359(6371), 80-83.
- Hughes, T.P., Kerry, J.T., Baird, A.H., Connolly, S. R., Dietzel, A., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Liu, G., McWilliam, M. J., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Skirving, W. J., Stella, J. S. and Torda, G. (2018b): Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, 556, 492–496.
- Kuwae, T., & Crooks, S. (2021). Linking climate change mitigation and adaptation through coastal green–gray infrastructure: a perspective. *Coastal Engineering Journal*, 63(3), 188-199.
- MacNeil, M. A., Mellin, C., Matthews, S., Wolff, N. H., McClanahan, T. R., Devlin, M., Drovandi, C., Mengersen, K. and Graham, N. A. (2019): Water quality mediates resilience on the Great Barrier Reef. *Nature ecology &*

- evolution, 3(4), 620-627.
- Maekouchi, N., T. Ano, M. Oogi, S. Tsuda, K. Kurita, Y. Ikeda, and H. Yamamoto (2008): The “Eco-Block” as a coral-friendly contrivance in port construction. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida.
- McMahon, A., Santos, I. R., Cyronak, T., & Eyre, B. D. (2013): Hysteresis between coral reef calcification and the seawater aragonite saturation state. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4675-4679.
- Morgan, K. M., C. T. Perry, S. G. Smithers, J. A. Johnson, and J. J. Daniell. (2016): Evidence of extensive reef development and high coral cover in nearshore environments: implications for understanding coral adaptation in turbid settings. *Scientific Reports* 6(1): 1-10.
- Morrison, T. H., Adger, N., Barnett, J., Brown, K., Possingham, H., and Hughes, T. (2020): Advancing coral reef governance into the Anthropocene. *One Earth*, 2(1), 64-74.
- Nakamura, T. (2010): Importance of water-flow on the physiological responses of reef-building corals. *Galaxea*, 12(1): 1–14.
- Narayan, S., M. W. Beck, B. G. Reguero, I. J. Losada, B. Van Wesenbeeck, N. Pontee, J. N. Sanchirico, J. C. Ingram, G. Lange, and K. A. Burks-Copes (2016): The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PloS one*, 11(5): e0154735.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019): A Research Review of Interventions to Increase the Persistence and Resilience of Coral Reefs. Washington, DC: The National Academies Press.
- Okada, T., Mito, Y., Iseri, E., Takahashi, T., Sugano, T., Akiyama, Y. B., Watanabe, K., Tanaya, T., Sugino, H., Tokunaga, K., Kubo, T., and Kuwae, T. (2019): Method for the quantitative evaluation of ecosystem services in coastal regions. *PeerJ*, 6, e6234.
- Omori, M., H. Kubo, K. Kajiwar, H. Matsumoto, and A. Watanuki. (2006): Rapid recruitment of corals on top shell snail aquaculture structures. *Coral Reefs*, 25(2): 280.
- Omori, M., H. Kajiwar, K. Matsumoto, A. Watanuki, and H. Kubo (2007): Why corals recruit successfully in top-shell snail aquaculture structures? *Galaxea*, 8: 83–90.
- Palumbi, S. R., Barshis, D. J., Traylor-Knowles, N., and Bay, R. A. (2014): Mechanisms of reef coral resistance to future climate change. *Science*, 344(6186), 895-898.
- Perkol-Finkel, S., and Benayahu, Y. (2004): Community structure of stony and soft corals on vertical unplanned artificial reefs in Eilat (Red Sea): comparison to natural reefs. *Coral reefs*, 23(2), 195-205.
- Pratchett, M. S., K. D. Anderson, M. O. Hoogenboom, E. Widman, A. H. Baird, J. M. Pandolfi, P. J. Edmunds, and J. M. Lough. (2015): Spatial, temporal and taxonomic variation in coral growth—implications for the structure and function of coral reef ecosystems. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 53, 215-295.
- Rogers, C. S. (1990): Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Marine ecology progress series*, 62(1): 185-202.
- Royal Society (2014): Resilience to Extreme Weather, The Royal Society Science Policy Centre Report. <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/resilience-extreme-weather/>.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J.-Y., White, D. J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P. and Cardona, A. (2012): Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods* 9(7): 676–682.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. (2012): NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". *Nature Methods*, 9, 671-675.
- Schläppy, M. L., and Hobbs, R. J. (2019): A triage framework for managing novel, hybrid, and designed marine ecosystems. *Global change biology*, 25(10), 3215-3223.
- Sebens, K. P., Grace, S. P., Helmuth, B., Maney Jr, E. J., and Miles, J. S. (1998): Water flow and prey capture by three scleractinian corals, *Madracis mirabilis*, *Montastrea cavernosa* and *Porites porites*, in a field enclosure. *Marine Biology*, 131(2), 347-360.
- Spalding, M., L. Burke, S. A. Wood, J. Ashpole, J. Hutchison, and P. Zu Ermgassen (2017): Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. *Marine Policy*, 82: 104-113.
- Sutton-Grier, A. E., K. Wowk, and H. Bamford. (2015): Future of our coasts: The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 51, 137–148.
- Suzuki, G., S. Kai, H. Yamashita, K. Suzuki, Y. Iehisa, and T. Hayashibara (2011): Narrower grid structure of artificial

- reef enhances initial survival of *in situ* settled coral. Marine pollution bulletin, 62(12), 2803-2812.
- Tanaya, T., Kinjo, N., Okada, W., Yasuda, M., and Kuwae, T. (2021). Improvement of the coral growth and cost-effectiveness of hybrid infrastructure by an innovative breakwater design in Naha Port, Okinawa, Japan. Coastal Engineering Journal, 63(3), 248-262.
- Tanaya, T., Iwamura, S., Okada, W., and Kuwae, T. (2025). Artificial structures can facilitate rapid coral recovery under climate change. Scientific Reports, 15(1), 9116.
- Van Oppen, M. J. H., Oliver, J. K., Putnam, H. M. and Gates, R. D. (2015): Building coral reef resilience through assisted evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112, 2307–2313.
- Van Oppen, M. J., Gates, R. D., Blackall, L. L., Cantin, N., Chakravarti, L. J., Chan, W. Y., Cormick, C., Crean, A., Damjanovic, K., Epstein, H., Harrison, P. L., Jones, T. A., Miller, M., Pears, R. J., Peplow, L. M., Raftos, D. A., Schaffelke, B., Stewart, K., Torda, G., Wachenfeld, D., Weeks, A. R., and Putnam, H. M. (2017): Shifting paradigms in restoration of the world's coral reefs. Global Change Biology, 23(9), 3437-3448.
- Williams, G. J., J. E. Smith, E. J. Conklin, J. M. Gove, E. Sala, and S. A. Sandin. (2013): Benthic communities at two remote Pacific coral reefs: effects of reef habitat, depth, and wave energy gradients on spatial patterns. PeerJ, 1, e81.
- Williams, S. L., Sur, C., Janetski, N., Hollarsmith, J. A., Rapi, S., Barron, L., Hearwale, S. J., Yusuf, A. M., Yusuf, S., Jompa, J. and Mars, F. (2019): Large - scale coral reef rehabilitation after blast fishing in Indonesia. Restoration Ecology, 27(2), 447-456.
- Zeebe, R. E. and Wolf-Gladrow, D. (2001): CO<sub>2</sub> in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes. Elsevier, 346p.

## 用語リスト

AIC: Akaike Information Criterion (赤池情報量規準)

ATP: Artificial tide pool (人工タイドプール) サンゴの加入  
成育を促進する効果を期待してケーソンの港内側  
の小段に設けられた、柵状の構造物

$[B(OH)_4^-]$ : テトラヒドロキシホウ酸イオンの濃度 ( $mmol\ kg^{-1}$ )

$Ca^{2+}$ : カルシウムイオン

$CaCO_3$ : 炭酸カルシウム

$C_{CC4}$ : インド太平洋地域における殻状石灰藻の成長速度  
の既往文献値の平均値 ( $0.057\ g\ CaCO_3\ cm^{-2}\ year^{-1}$ )

$CO_2$ : 二酸化炭素

$[CO_2^*]$ : 溶存二酸化炭素の濃度 ( $mmol\ kg^{-1}$ )

$[CO_3^{2-}]$ : 炭酸イオンの濃度 ( $mmol\ kg^{-1}$ )

DIC: Dissolved Inorganic Carbon (溶存無機炭素濃度)  
( $mmol\ kg^{-1}$ )

DL: Datum line (工事用基準面)

FRP: Fiber Reinforced Plastic (繊維強化プラスチック)

$[H^+]$ : 水素イオンの濃度 ( $mmol\ kg^{-1}$ )

$[HCO_3^-]$ : 重炭酸イオンの濃度 ( $mmol\ kg^{-1}$ )

$H_2O$ : 水

LWL: Low water level (朔望平均干潮面)

NEC: 生態系の正味の石灰化速度 ( $mmol\ m^{-2}\ h^{-1}$ )

$p$ :  $p$ 値

PB: Pro-environment breakwater (生物共生型防波堤)

$\Delta t$ : 観測時間 (h)

TA: Total Alkalinity (全アルカリ度) ( $mmol\ kg^{-1}$ )

$\Delta TA$ : TAの変化量 ( $mmol\ kg^{-1}$ )

TP: Tokyo Peil (東京湾平均海面)

アイソメトリック図: 等角投影図, X, Y, Z軸の間隔が $120^\circ$   
になるように立体を投影した図, 立体の高さ, 幅及  
び奥行きが同じ寸法で描かれている

嵩上げマウンド: 防波堤港内側のマウンドを嵩上げた  
もの

グレーチング: 格子状の構造物

ケーソン: 防波堤などの水中構造物の築造に用いられる  
主として鉄筋コンクリート製の箱状の構造物

コベネフィット: 多様な機能が相乗する便益

サンゴ被度: 底面をサンゴが被覆する比率 (%)

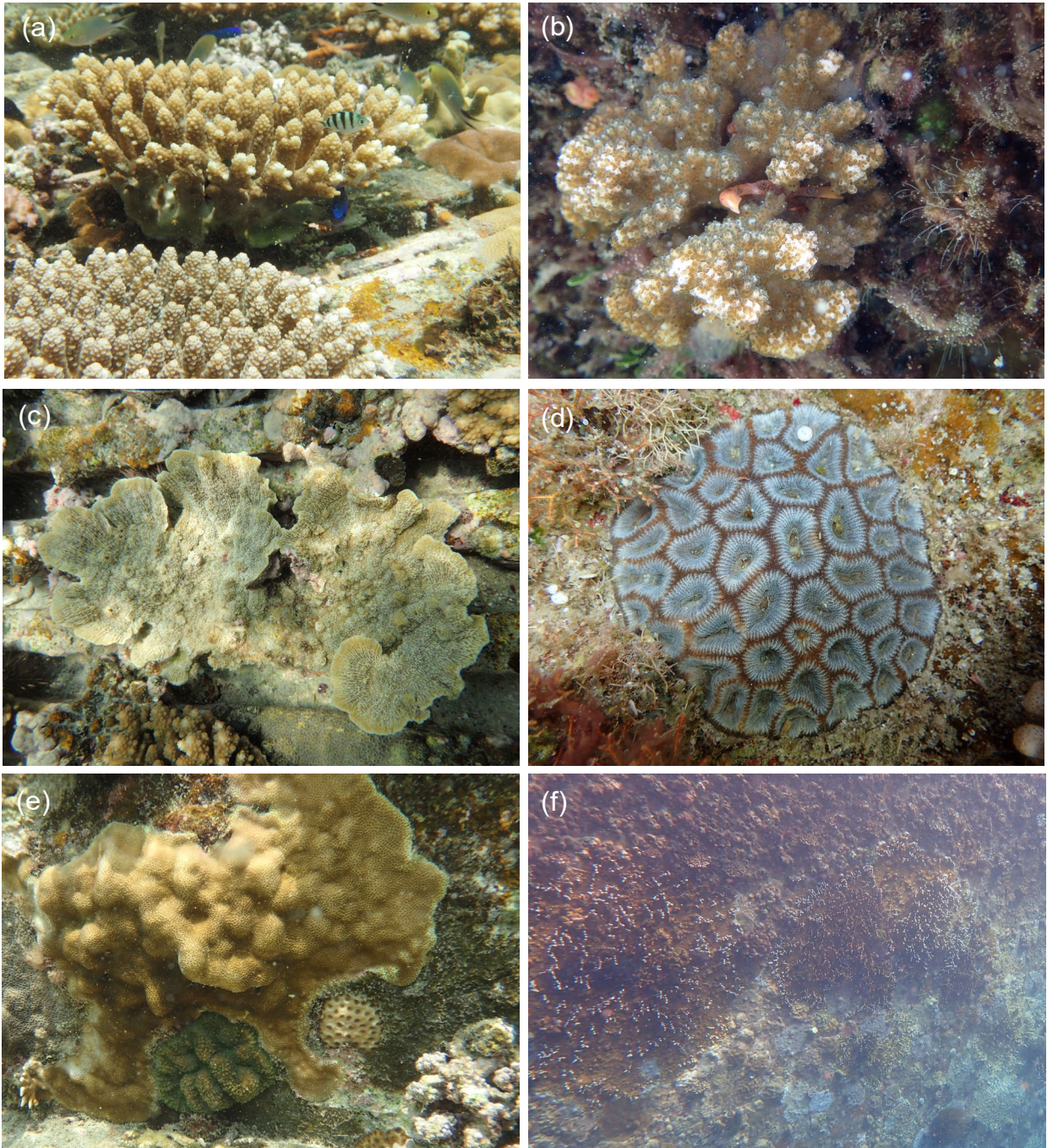
サンゴ総被度: ソフトコーラルを除くサンゴ被度の合計  
値 (%)

生態系サービス: 生物多様性を基盤とする生態系から人  
間が得られる様々な恵み (便益)

ソフトコーラル: 硬い骨格を持たないサンゴ。

通水型ケーソン: 港内の海水交換の促進に配慮し, 隣り合  
うケーソンの隙間 (目地) の切り欠き幅を広げたケ  
ーソン

付録 A 防波堤に着生するサンゴの例



(a) ミドリイシ属 (*Acropora* sp.), (b) ハナヤサイサンゴ属 (*Pocillopora* sp.), (c) コモンサンゴ属 (*Montipora* sp.), (d) キクメイシ科 (Faviidae), (e) ハマサンゴ属 (*Porites* sp.), (f) アナサンゴモドキ属 (*Millepora* sp.) の一種を示す. キクメイシ科 (Faviidae) は, 西平・Veron (1995) に基づく分類で, 現在は分類体系が変更されサザナミサンゴ科 (Merulinidae) に吸収されているが, 本稿では過去の調査における分類との整合性を保つためにキクメイシ科 (Faviidae) と表記する.