

1. サンゴ礁の機能と現状および社会的課題

1. 1 造礁サンゴとサンゴ礁

造礁サンゴとサンゴ礁の関係を図 I.1-1 に示す。

サンゴとは、石灰や角質の骨を有する刺胞動物の総称で、このうちサンゴ礁の形成に主要な役割を果たしているものを造礁サンゴと呼ぶ。褐虫藻と総称される渦鞭毛藻を細胞内に保持する有藻性サンゴのため、褐虫藻の光合成による炭水化物を主な栄養源として多孔質の石灰の骨格を形成し成長が速い。サンゴ礁とは、主に造礁サンゴが死滅して残った骨格の上に新たなサンゴが成長することを繰り返して骨格が堆積してできた石灰岩の地形である。有孔虫、二枚貝、石灰藻もサンゴ礁の石灰岩形成に寄与する。典型的なサンゴ礁地形は、海面近くまで堆積してできた礁嶺の陸側に浅い礁池、沖側に礁斜面となる。

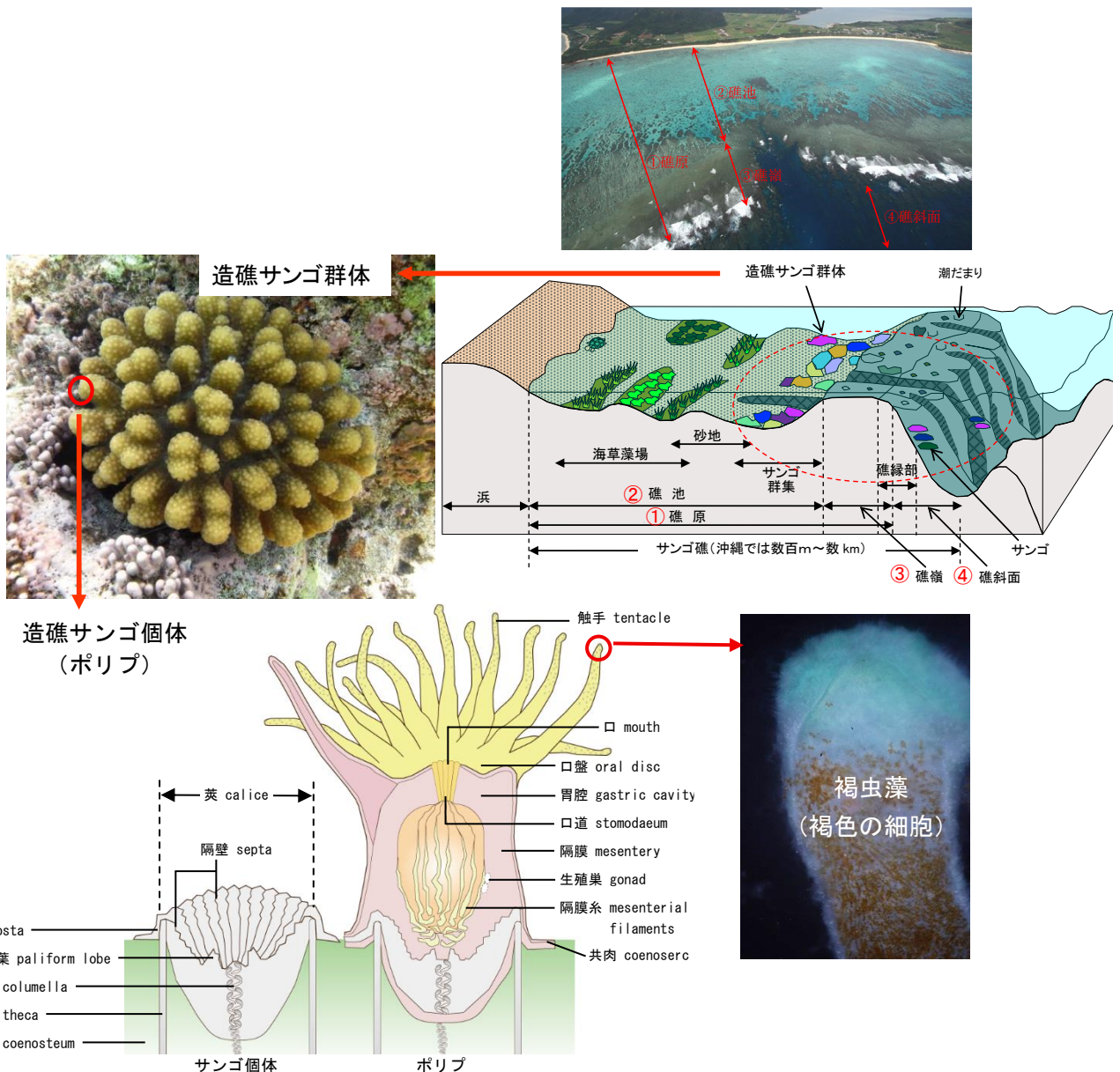


図 I.1-1 造礁サンゴとサンゴ礁
西平・Veron (1995) 等をもとに作成

サンゴ礁のタイプは、裾礁、環礁、堡礁、卓礁の4つに大別される（図 I.1-2）。沖縄沿岸では多くのサンゴ礁が裾礁であり、環礁や堡礁は日本周辺海域ではほとんどみられない。沖ノ鳥島は卓礁に分類される。

- ①裾礁：島の周りを縁取るようにして発達するサンゴ礁。
- ②環礁：中央に深い礁湖をもった環状に配列したサンゴ礁。
- ③堡礁：陸地から遠く離れ、一定の距離をおいて発達するサンゴ礁で、島との間に深い水域がある。
- ④卓礁：陸地から離れた場所にあり、礁湖を持たず礁原だけからなる平坦なサンゴ礁。

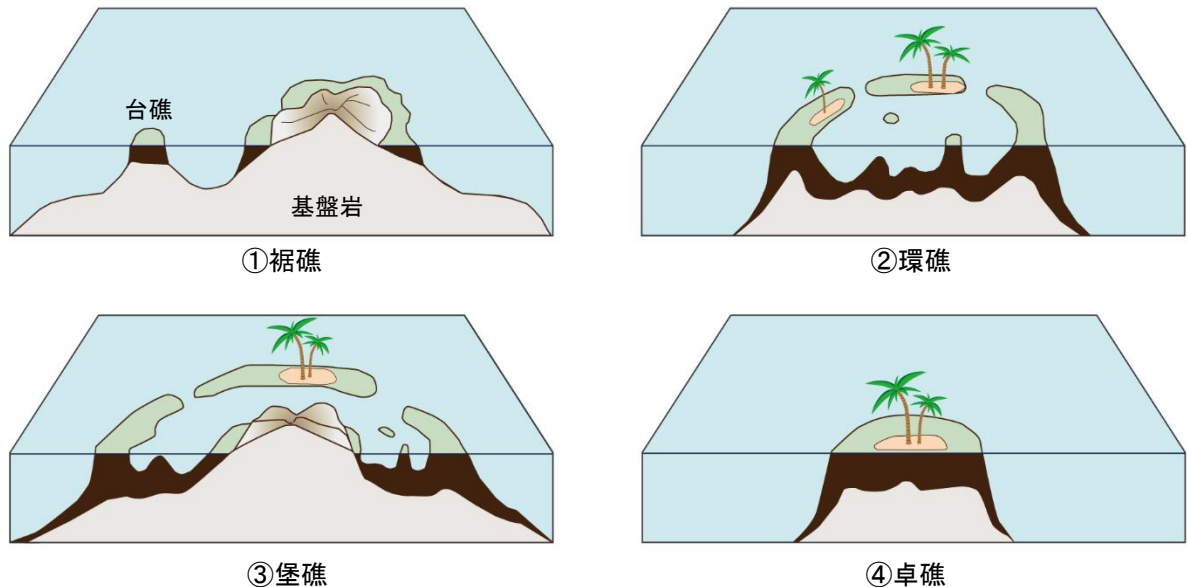


図 I.1-2 サンゴ礁のタイプ

目崎 (1988)

サンゴ礁を形成する造礁サンゴは、クラゲやイソギンチャクと同じ刺胞動物の仲間である。刺胞動物の仲間（刺胞動物門）は、餌料生物を捕食するための「刺胞」を有していることが特徴である。硬い石灰質の骨格をもつ硬質サンゴのうち、褐虫藻という渦鞭毛藻の一種を体内に共生させ、サンゴ礁形成に寄与するものを一般的には造礁サンゴと呼んでいる。体内に褐虫藻を共生させる有藻性サンゴに含まれる種は造礁サンゴのそれとほぼ重なり、六放サンゴ綱イシサンゴ目の種、八放サンゴ綱 Malacalcyonacea 目クダサンゴ科の種、Scleralcyonacea 目アオサンゴ科の種、ヒドロ虫綱花クラゲ目アナサンゴモドキ科の種を含み（図 I.1-3）、多くの種は成長が速く、大量の石灰質の硬組織を生産し、サンゴ礁の基盤となる素材を作る役割が大きい。

造礁サンゴの仲間のなかで、ミドリイシ類は最も成長が速く、群体形が後述する樹枝状や散房花状やテーブル状で、それらが形成する複雑な空間が水産生物の産卵場や生息場、餌場を提供するとともに、共生する褐虫藻の光合成産物（有機物）が海水中の栄養が少なく透明度の高いサンゴ礁海域の水産基盤を支えている。

造礁サンゴの形態を見ると、ポリプはサンゴを構成する基本的単位で、すべてのサンゴの体はポリプで構成されている。ポリプは、図 I.1-1 に示すように円筒形の体と上面の口とそれを取り巻く多数の触手から構成される。サンゴには複数のポリプからなる群体

サンゴと一個のポリプからできている単体サンゴとがある。造礁サンゴ全体としては、岩や基盤に固着して生活する群体サンゴが多く、これらの種はポリプが出芽・分裂、即ち無性生殖によって群体が大きくなる。

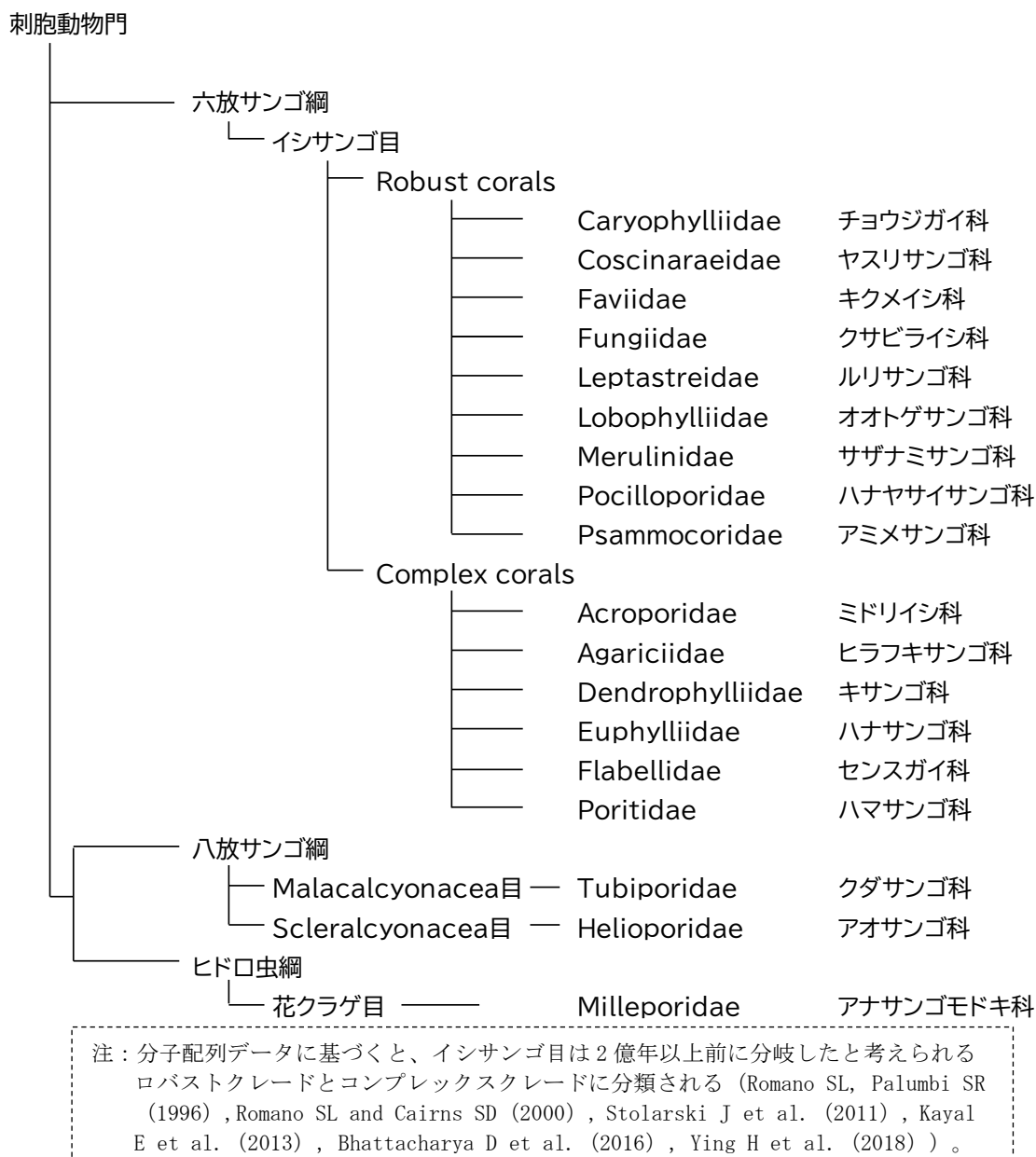


図 I.1-3 主な造礁サンゴの分類上の位置

造礁サンゴの群体形は様々であるが、表 I.1-1 に示す6つの基本形に分類される。種に特有の形態的な特徴を保持しながらも、環境条件に対応して群体形を変える可塑性をもっている種が極めて多い。

表 I.1-1 サンゴの群体形

被覆状群体

岩盤から立ち上がらずに被覆して成長する。群体表面にのみポリプがみられる。

この形状の群体は、水平な岩面上では堆積物によって埋められる危険性が高い群体形であるものの、波浪によって剥離される危険性は小さい。



塊状群体

群体の周縁部でポリプを出芽しながら基盤から上方向に長く伸びつつ出芽し、共骨も成長することによって群体が形成される。群体表面にのみポリプが見られ、穿孔性の動物が住み込み易い群体内部は骨格が詰まって丈夫である。



葉状群体

被覆状の群体が基盤から立ち上がり、薄い骨格のまま基盤上方に伸びた形状である。骨格が薄く、基盤から立ち上がる形状のため、波浪等による物理的破壊の危険性が高いものの、被覆状群体と同程度の骨格量で群体を支えているため比較的強度は保持され、堆積物による成長への影響も少ない。また、基部が死亡しても、上部（先端部付近）は生きていることが多い。



樹枝状群体

成長初期の被覆状群体から一部分が突出し、基盤から立ち上がった箇所が複数に枝分かれして群体が形成される。分枝した箇所が繊細になるほど群体表面積は増加するものの、強度は弱くなり、枝が折れやすくなる。枝間には多様な動物が住み込む。



散房花状群体（コリンボース状群体）

基部から放射状に横に張り出した枝から枝が多数伸びてできる群体形。



テーブル状群体

基部から円盤状に広がり、そこから多数の短い枝が立つ群体形。



1. 2 サンゴの生活史

造礁サンゴの生活史の概要を図 I. 1-4 に示す。

造礁サンゴの増殖過程には、成熟した親サンゴが産卵し、卵と精子が受精した後にプラヌラ幼生を経て基盤に着生（本手引きでは、プラヌラ幼生が基盤に触れることを着底、変態を完了してポリプになることを着生とした）して一つのポリプとなる有性生殖と、ポリプが次々とクローンを作って群体を形成していく無性生殖がある。

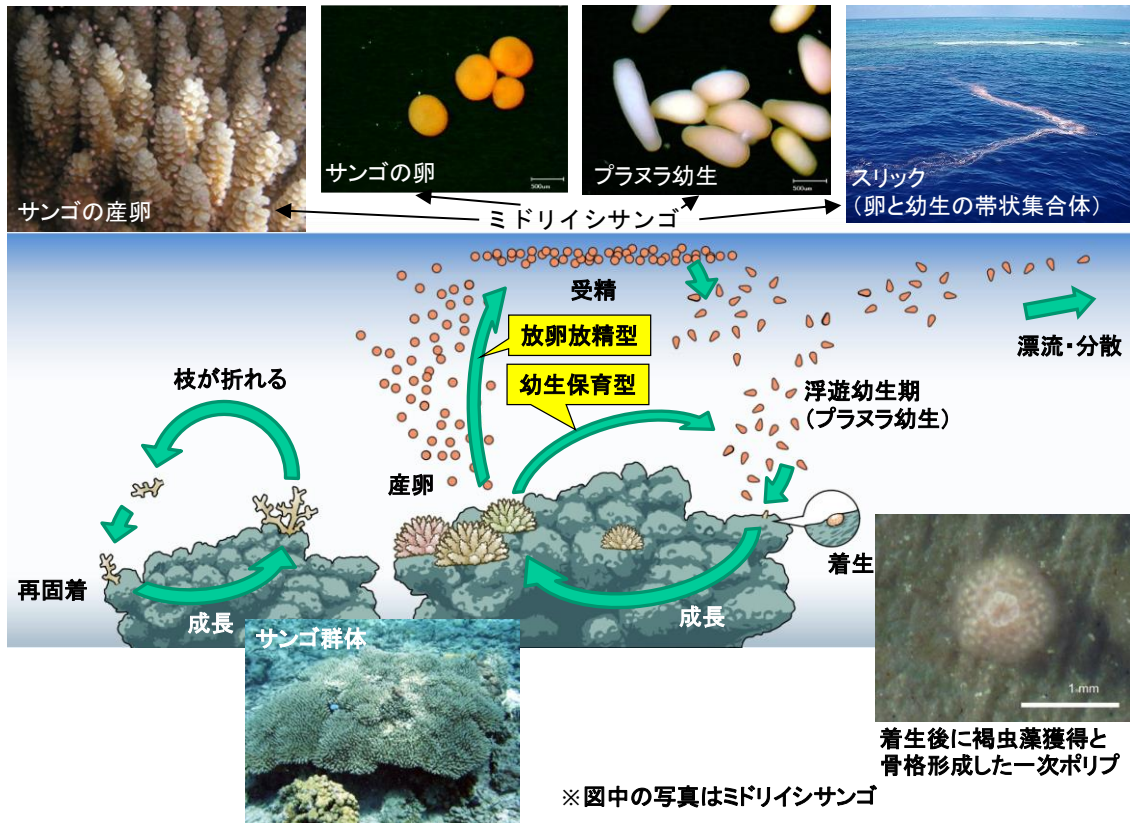


図 I. 1-4 造礁サンゴの生活史
海の自然再生ワーキンググループ(2003)等をもとに作成

1) 産卵

サンゴには、成熟期に一斉に放出された卵と精子が受精しプラヌラ幼生へと発生する「放卵放精型」と、体内で成長したプラヌラ幼生を放出する「幼生保育型」の2タイプがある。またそれぞれ、「雌雄同体」及び「雌雄異体」の二型がある。

2) 産卵期、成熟期

琉球列島における主な「放卵放精型」のサンゴの産卵時期を表 I. 1-2 に示す。サンゴの産卵時期は種類や地域によって異なるが、多くのサンゴは年1回の成熟期を持ち、沖縄の場合、ミドリイシ科は5~8月、キクメイシ科などは7~8月に多く産卵する。ミドリイシ科の多くは産卵期の満月の大潮の前後数日の夜に一斉産卵する。近隣の海域や、広いサンゴ礁の中での群体では、産卵日が数日ずれることもある。同じ海域でも産卵時期は毎年同じではなく、海水温や海況などにより違いが生じる。

3) 受精、幼生分散、着生

放卵放精型のサンゴには海面に浮かぶ浮性卵を産む種と海底に沈む沈性卵を産む種がある。浮性卵を産む種類のなかでも、ミドリイシ属、コモンサンゴ属、キクメイシ属などは、雌雄同体のポリプの内部で卵と精子がひと塊にされて放出される。この卵と精子の塊をバンドルと呼ぶ。自家受精は少なく、基本的には同種他群体から放出された卵と精子とが受精し、プラヌラ幼生になる。多数のサンゴ群体が一斉に産卵した後は、卵や胚の密な集団が帯状に海面を漂流することがあり、これをスリックと呼ぶ。

浮遊性のプラヌラ幼生は数日から数週間、種によっては100日以上寿命があり、その間に海面を漂流し、やがて海底に沈んで着生する。漂流中のプラヌラ幼生は餌を摂らず、生存期間は卵黄の栄養に依存している。プラヌラ幼生は漂流によって分散するが、海流や吹送流次第で沖合に流されたり海岸に漂着したりすることもあり、またその後の成長に適さない環境に行き着くこともあり、生残率は極めて低い。プラヌラ幼生が着生するにあたって、岩盤上の微細環境を選ぶ種と選ばない種がある。

着生とともにイソギンチャク型の形態であるポリプに変態し、骨格を形成しつつ成長する。群体性の種では、出芽または分裂による無性生殖を繰り返し、クローンの集合体である群体として成長する。

4) 成長、成熟

ミドリイシサンゴは、着生から数ヶ月で群体の直径が1cm程度まで成長し、3~5年程度で直径数十cmに成長する。Harrison and Wallace (1990)によると、クシハダミドリイシ (*Acropora hyacinthus*) の成熟最低サイズは直径7cm、推定年齢では生後4~5年で産卵が可能となる。下村 (2004) によると、ウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) の産卵開始サイズは面積379cm² (真円直径22cm) である。また、ハナヤサイサンゴ (*Pocillopora damicornis*) では直径4~7cm、ヒメウネカメノコキクメイシは直径3~4cmで成熟サイズになるとされている。

5) サンゴ群体破片の再固着からの群体再生

台風などで発生した大きな波浪により、サンゴ群体の枝が折れて断片化し、周辺の海底に散らばったり、波浪などにより離れた場所に運ばれたりする。断片化したサンゴ片が生き残る率は低いとされているが、条件が良ければ、サンゴ片は長期間生存でき、安定した基盤上に長時間接触すると、基盤上に再固着し始め、成長していく。樹枝状の種では断片再生によって大群落を形成していることがある。

サンゴの無性生殖による移植はこの特性を利用している。

表 I. 1-2 主なサンゴの産卵時期

林原 (1995) を改変：沖縄県座間味村阿嘉島周辺及び水槽飼育で観察期間(1989年5-7月、1990年5-8月、1991-1993年5-9月)中に、産卵を直接観察したり、定期観察から産卵を推定したり生殖腺の成熟が観察されたりした月を ■ で示す。
(分類体系・学名は日本造礁サンゴ分類研究会 2023 による)

種名	5月	6月	7月	8月	9月	種名	5月	6月	7月	8月	9月
ACROPORIDAE						PORITIDAE					
<i>Acropora aculeus</i>				■		<i>Porites lutea</i>		■	■		
<i>A. anthocercis</i>			■	■		PACHYSERIDAE					
<i>A. aspera</i>	■	■				<i>Pachyseris speciosa</i>				■	
<i>A. austera</i>		■	■	■		DIPLOASTRAEIDAE					
<i>A. clathrata</i>			■			<i>Diploastrea heliopora</i>		■			
<i>A. cytherea</i>	■	■				FUNGIIDAE					
<i>A. abrotanoides</i>		■				<i>Lithophyllon repanda</i>			■	■	
<i>A. digitifera</i>	■	■				<i>Sandalolitha robusta</i>			■	■	
<i>A. divaricata</i>			■	■		LEPTASTREIDAE					
<i>A. akajimensis</i>		■				<i>Leptastrea purpurea</i>			■		
<i>A. elseyi</i>	■	■				LOBOPHYLLIIDAE					
<i>A. exquisita</i> ?	■					<i>Echinomorpha nishihirai</i>				■	
<i>A. florida</i>		■	■			<i>Echinophyllia aspera</i>			■		
<i>A. muricata</i>	■	■				<i>Lobophyllia corymbosa</i>		■			
<i>A. gemmifera</i>	■	■		■		<i>Oxypora lacera</i>		■			
<i>A. grandis</i>	■	■		■		MERULINIDAE					
<i>A. horrida</i>				■		<i>Astrea curta</i>			■	■	
<i>A. humilis</i>	■		■	■		<i>Caulastrea furcata</i>		■			
<i>A. sp. HC</i>	■	■				<i>Coelastrea aspera</i>		■	■		
<i>A. latistella</i>				■		<i>Cyphastrea chalcidicum</i>		■			
<i>A. longicyathus</i>	■					<i>C. serailia</i>			■		
<i>A. loripes</i>	■	■	■			<i>Dipsastraea amicornum</i>			■		
<i>A. lutkeni</i>				■		<i>D. favus</i>			■	■	
<i>A. microclados</i> ?				■		<i>D. lizardensis</i> ?		■			
<i>A. microphthalma</i>	■	■				<i>D. matthaii</i>		■	■		
<i>A. millepora</i>		■				<i>D. pallida</i>		■	■	■	
<i>A. nasuta</i>	■	■		■		<i>D. speciosa</i>		■			
<i>A. intermedia</i>	■	■				<i>D. veroni</i>				■	
<i>A. pulchra</i>	■	■				<i>Echinopora gemmacea</i>		■			
<i>A. robusta</i>	■	■				<i>E. pacifica</i>		■			
<i>A. samoensis</i>			■	■		<i>Favites abdita</i>			■	■	
<i>A. secale</i>				■		<i>F. chinensis</i>		■			
<i>A. selago</i>		■				<i>F. flexuosa</i>			■	■	
<i>A. sp. aff. Tenuis</i>	■	■				<i>F. halicora</i>		■	■	■	
<i>A. valenciennesi</i>	■	■				<i>F. magnistellata</i>			■	■	
<i>A. valida</i>		■	■	■		<i>F. valenciennesi</i>			■	■	
<i>A. verweyi</i> ?				■		<i>Goniastrea pectinata</i>			■	■	
<i>Astreopora myriophthalma</i>		■	■			<i>G. retiformis</i>		■	■	■	
<i>Montipora digitata</i>	■	■				<i>G. stelligera</i>			■	■	
<i>Montipora hispida</i>		■				<i>Hydnophora exesa</i>			■		
<i>M. aequituberculata</i>	■	■				<i>H. rigida</i>	■	■	■		
<i>M. peltiformis</i>	■	■		■	■	<i>Merulina ampliata</i>			■	■	
<i>M. turgescens</i>		■		■		<i>M. scabricula</i>			■		
<i>M. mollis</i> ?			■	■		<i>Pectinia lactuca</i>			■		
<i>M. venosa</i>			■	■		<i>Platygyra contorta</i>			■		
<i>M. efflorescens</i>				■		<i>P. daedalea</i>		■	■		
DENDROPHYLLIIDAE						<i>P. lamellina</i>		■	■		
<i>Turbinaria stellulata</i>	■					<i>P. pini</i>		■			
EUPHYLLIIDAE						<i>P. ryukyuensis</i>		■	■	■	
<i>Euphyllia divisa</i>				■		<i>P. sinensis</i>		■	■		
<i>Galaxea fascicularis</i>		■	■	■							

1. 3 サンゴの地理的分布と生息環境

1) サンゴの地理的分布

世界の造礁サンゴの地理的分布を図 I.1-5 に示す。

サンゴは、赤道を挟んで北緯 30 度と南緯 30 度の間の大陸や島の周辺の浅海域に主に分布している。造礁サンゴの分布には、海流が強く影響しており、緯度が高くなるほど種類が減少し、三大洋では暖流が発達し島嶼が多い西側ほどサンゴ礁が発達するという特徴がある（本川 2008）。

世界のサンゴ礁の総面積は 60 万 km² で、地球表面のわずか 0.1% に過ぎないが、そこで確認されている生物種は 9 万種を超えている。

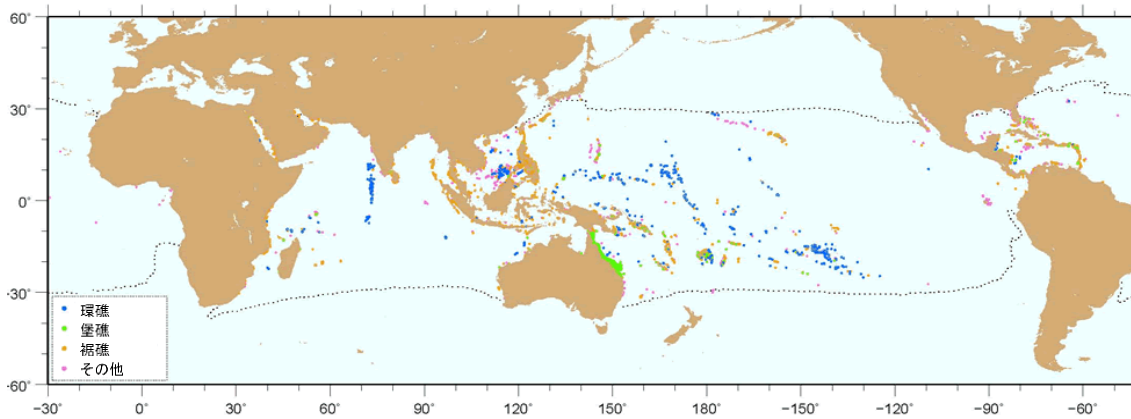


図 I.1-5 世界の造礁サンゴ分布図
茅根ほか(2004)をもとに作成

日本のサンゴ礁とサンゴ群集の地理的分布を図 I.1-6 に示す。

日本のサンゴ礁は、主として、北緯 24 度から 29 度の琉球列島（沖縄県と鹿児島県の奄美諸島）と小笠原諸島（東京都）に多く分布しており、世界のサンゴ礁分布域の北限とされている。その他に、尖閣諸島、大東諸島、硫黄列島、伊豆諸島、南鳥島、沖ノ鳥島などにサンゴ礁がある。北緯 20 度の沖ノ鳥島が日本のサンゴ礁の分布の南限である。サンゴ群集は、太平洋側では千葉県館山湾、日本海側では佐渡ヶ島周辺海域まで分布が確認されている。

日本において緯度が高い割に造礁サンゴの種の多様性が高い要因としては、黒潮の影響によるところが大きい。つまり、琉球列島に沿って世界最大の暖流である黒潮が北へ流れるので同じ緯度の海域より水温が高く、南からサンゴが供給されるので、琉球列島のサンゴ礁は世界のサンゴ礁の分布域の北限にあたるが、種の多様性が高く、サンゴ礁地形の連続性が高く、規模も大きい（茅根ほか 2004）。

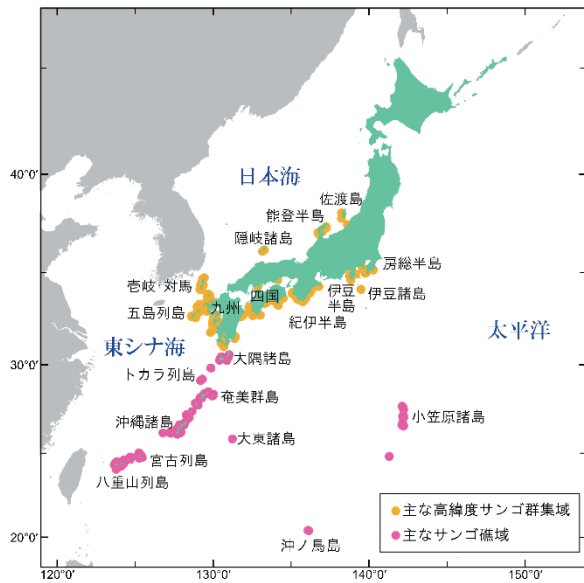


図 I.1-6 日本のサンゴ礁とサンゴ群集の分布
(環境省 2022)

サンゴ群集の分布域は近年の地球温暖化がもたらす水温上昇によって北上しつつある。造礁サンゴの分布限界を決める冬期の水温は日本近海で造礁サンゴが分布している海域では100年間に1.1~1.6℃上昇しており、サンゴ分布域は過去80年間の記録を解析した結果、最大14km/年の速度で北上していると報告されている（Yamano et al. 2011）。

2) サンゴの生息環境

サンゴと環境条件との関係を図 I.1-7 に示す。

サンゴの加入・成長・生残とサンゴ礁の形成に影響を与える要因としては、物理化学的要因、地形地質的要因、生物的要因、人間活動等があり、これらが複合的に関与している。

(1) 浮遊期の環境条件

サンゴの生活史の初期ステージである浮遊期のプラナラ幼生は体表の繊毛により弱い遊泳力をもつが、波浪や流況の影響を受けて移動・分散するため移動範囲は自身の拡散と水塊の移動による制約を受ける。プラナラ幼生は数日~数週間（最大100日以上）の浮遊生活をしたのち、成育に適した場所に着生してポリプとなる。浮遊幼生（プラナラ幼生）は魚類に捕食されたり、海岸に打ち上げられたり、成育に適した場所にたどり着くことができないなどにより、その大部分は死滅する。

(2) 着生後の環境条件

着生後のサンゴ群集の成育を制限する環境条件としては、水温・塩分・栄養塩、光環境（水中照度、水深、濁り）、波・流れ、基盤の有無、基盤の傾度等の物理化学的環境と藻類との競合や魚類や無脊椎動物による食害が考えられる。サンゴの生息にはこれらの制限要因が少ないことが必要となる。サンゴの成長には褐虫藻による光合成が大きく関与していることから、造礁サンゴの分布は光の条件を通じて水深にも制約を受ける。さらに、他のサンゴや藻類や底生動物との生息場をめぐる競合、餌や環境及び人間活動（土砂流入による光量不足・土砂の堆積・着生場所の消失、富栄養塩化）の影響を受け、着生直後からサイズの小さい時期の減耗がきわめて大きい。

近年では、赤土や富栄養化などのローカルな環境ストレスに加えて、海水温の上昇が長く続くことによるサンゴの白化現象や、台風の大型化に伴う強い波浪による影響などのグローバルな環境ストレスが成育を阻害している。また海洋酸性化による影響も懸念されている。

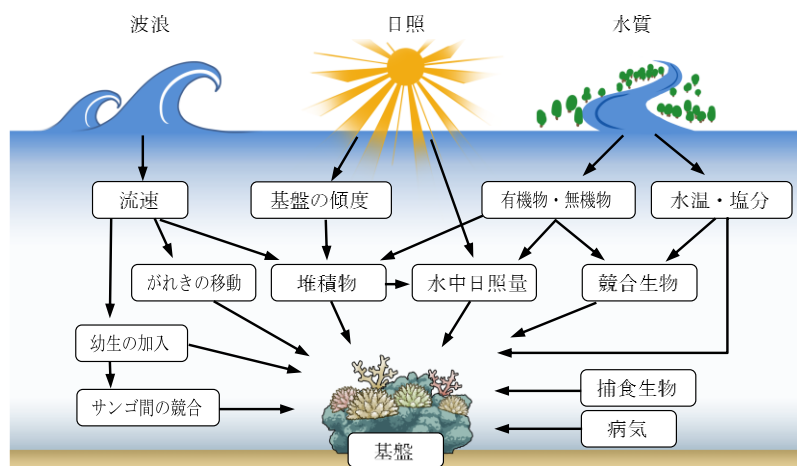


図 I.1-7 サンゴと環境条件

Yamamoto et al. (2002) 等をもとに作成

1. 4 サンゴ礁の多様な機能

サンゴ礁の主な機能を図 I.1-8 に示す。

サンゴ礁は海洋面積の 0.2%にも満たないが、93,000 種以上の動植物の棲息場所となり、浅海の生物の 35%以上の種を保持し、世界人口の実に 2 割、80 以上の国の数え切れない地域社会が収入と食料をサンゴ礁に依存し、1km²のサンゴ礁が、年間 15 トンの食料を生産し、それは、1,000 人以上を養うに十分である (Kimble 2002)。サンゴ礁の種の多様性については 830,000 種以上が見られるという報告もある (Fisher et al. 2015)。

サンゴの体内に共生している褐虫藻の光合成が一次生産としてサンゴ礁生態系における食物連鎖の基盤となり、またサンゴの骨格形成のエネルギーとなる。サンゴの作り出す複雑な空間地形には多種多様な生物が共存し、サンゴ礁は水産物の生産の場や水質浄化としての重要な機能を持つ。また、サンゴ礁には、美しい景観をもたらす観光機能、天然の防波堤としての防災機能、海の文化人類学の研究や生態系のしくみを知る環境教育の場としての機能があり、地形学・地質学・古生物学による過去の地球環境変動を把握する場としても重要である。さらに、古いサンゴの岩石化した琉球石灰岩は石垣や漆喰の材料として利用されている。最近では、サンゴやイソギンチャク、カイメンなどのサンゴ礁域の有用生物が医薬品などとしても注目されており、他の産業にも利用可能な物質が得られる可能性がある。

こうしたことから、サンゴ礁が大きな環境攪乱を被ると、これらの機能が減少あるいは消滅し、水産資源の減少や観光資源の質の低下など大きな社会問題を招くおそれがある。以下に、漁場としての機能以外の機能について記す。

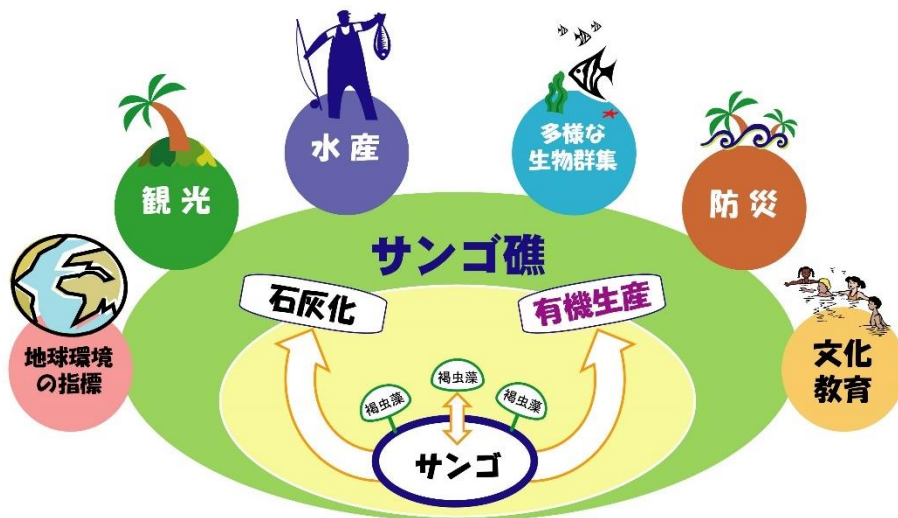


図 I.1-8 サンゴと褐虫藻の共生関係によって形成されるサンゴ礁の主な機能

1) 多種多様な生物を共存・生産する機能

全海水魚類の約 4 分の 1 の 4,000 種がサンゴ礁魚類であり (Spalding et al. 2001)、サンゴ礁は、生物種の最も豊富な生態系の一つである。サンゴ礁域は貧栄養塩濃度の海域であるが、サンゴの体内に共生する褐虫藻によって基礎生産が行われ、サンゴから放出される粘液が多く魚類や底生動物の餌になり、複雑な食物連鎖が形成される。

熱帯・亜熱帯の海洋では透明度が高く栄養塩濃度が低いことから、生産性が低いように

誤解を受けるが、寒冷な海洋とは異なり、溶存有機物質は食物網を通じてすみやかに可視的サイズの生物に捕食されるために清澄なのであり、生産性が低いわけではない。

また、海中のカルシウム分を蓄積した骨格による立体構造は、多種多様な生物の生活場所を提供する（図 I.1-9）。さらには、サンゴ礁の海底に堆積した砂質地盤には海草藻場が形成され、サンゴと同様、一次生産等の役割を担う。サンゴ礁の生物多様性が高いことも、十分な生産性があるからこそ成り立っている。

地球上の生物相は、基本的には太陽光を同化することができる植物を一次生産者として形成されており、一次生産量の高い地域ではそれらを利用する動物の環境収容力が高くなる。海域では、一次生産量の高い地域が水産資源量の高い海域であると言い換えることができる。表 I.1-3 に地球上の主な純一次生産量の一覧表を示す。海域は、外洋、湧昇流海域、大陸棚、藻場とサンゴ礁、入江に区分されており、藻場とサンゴ礁では単位面積当たりの純一次生産量の平均値が $2,500\text{g}/\text{m}^2/\text{年}$ で最も高く、陸域の熱帯多雨林の値 ($2,200\text{g}/\text{m}^2/\text{年}$) 以上であり、地球上で最も純一次生産量の高い地域であることを示している。藻場とサンゴ礁が併記されているのは、サンゴは体内に共生する褐虫藻の光合成量が藻場と同程度であることを示している。



図 I.1-9 サンゴに群がる魚たち

表 I.1-3 主な生態系の純一次生産量

生態系のタイプ	面積 10^6km^2	単位面積あたりの純一次生産 $\text{g}/\text{m}^2/\text{年}$		世界の純一次生産 $10^9\text{t}/\text{年}$	単位面積あたりの生物量 kg/m^2		世界の生物量 10^3t
		範囲	平均		範囲	平均	
熱帯多雨林	17.0	1000~3500	2200	37.4	6~80	45	765
熱帯季節林	7.5	1000~2500	1600	12.0	6~60	35	260
外洋	332.0	2~400	125	41.5	0~0.005	0.003	1.0
湧昇流海域	0.4	400~1000	500	0.2	0.005~0.1	0.02	0.008
大陸棚	26.6	200~600	360	9.6	0.001~0.04	0.01	0.27
藻場とサンゴ礁	0.6	500~4000	2500	1.6	0.040~4	2	1.2
入江	1.4	200~3500	1500	2.1	0.010~6	1	1.4
海洋合計	361.0		152	55.0		0.01	3.9

ホイタッカー (1979) をもとに作成

サンゴは海水中の懸濁態有機物や動物プランクトンを摂食し、礁池に堆積する有機物はベントスによって摂食される。栄養塩は植物プランクトンや藻類によって吸収され、植物プランクトンは増殖しては動物プランクトンやシャコガイに捕食され、藻類は魚類やベントスに食べられる。動物の糞は懸濁態有機物や堆積有機物となって食物網に組み込まれる。このようにサンゴ礁の生態系における食物網によって海水中の微粒子は少なく保たれ、透明度の高い海水となる（図 I.1-10）。



図 I.1-10 触手を伸ばして海中の有機物を摂餌

2) 観光・景観機能

図 I. 1-11 に沖縄県の観光収入の推移を示す。沖縄県の観光客数や観光収入は増加傾向にある。観光客数は昭和 47 年（1972 年）の 56 万人と比較して、50 年後の令和 4 年（2022 年）では 677 万人と 12 倍以上、観光収入は 21 倍以上に増加している。観光客の約 40.3%が海水浴・マリンレジャー・ダイビングを目的としていることから（沖縄県 2024）、サンゴ礁は大きな観光資源になっている（図 I. 1-12）。

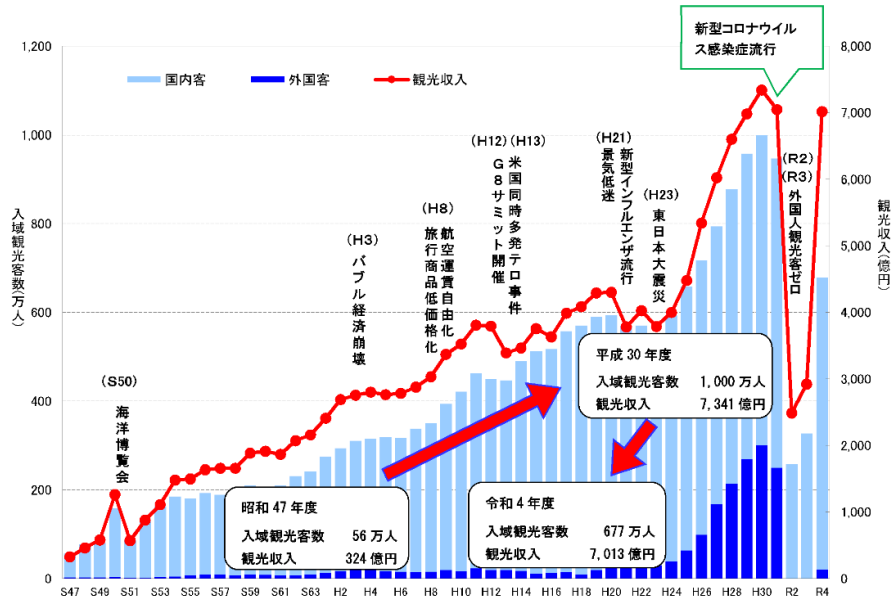


図 I. 1-11 沖縄県の観光客数と観光収入の推移
(沖縄県 2024a)



図 I. 1-12 美しいサンゴ礁の景観は安らぎを与え、レジャーの場となる

3) 防災機能

サンゴ礁が海岸線を取り囲むことで、礁嶺が津波や台風などの高波浪を砕波し、背後集落の人命・財産を海岸災害から保護している。この場合のサンゴ礁は自然の防波堤と言える。また、サンゴの骨格や有孔虫の殻はサンゴ礁内の砂となり、砂浜の形成に大きく貢献するとともに、海岸保全の重要な役割を果たしている（図 I. 1-13）。



サンゴ礁は大波浪から島を護る

サンゴの骨格や有孔虫の殻で砂浜が造られる

図 I.1-13 サンゴ礁は防波堤の機能を持ち、サンゴは海浜を造る

4) 文化・教育研究の場としての機能

サンゴ礁域の住民は生活・文化・経済等においてサンゴ礁に大きく依存しており、サンゴ礁との関わりの中から神事や行事などの独自の文化が発達している。海の幸や航海の安全を祈願した海神祭やハーリーなどの神事のように、サンゴ礁がもたらす豊富な漁獲物なくして、これらの伝統的な文化の継承も難しい。健全なサンゴ礁生態系の存在は、これらの地域の持続・発展にとって重要である。

人間活動と環境との関わり方の理解と認識を養う環境教育の場や、学問研究の場としてもサンゴ礁は利用されている。水産庁では「水産多面的機能発揮対策事業」の中で、漁業者が中心となってサンゴ礁の保全活動に取り組むための、教育・学習の場として活用されている（図 I.1-14）。



図 I.1-14 水産多面的機能発揮対策事業（水産庁）

5) 地球環境変動の指標としての機能

サンゴの成育は地球の環境変動の影響を受け、残された骨格を調査することで過去の環境条件が推察できる。例えば、大型のハマサンゴからコアを採取してその年輪を用いて過去数百年にわたる水温や降水量の復元を試みることができる。また、骨格の中から酸素同位体比やマグネシウム／カルシウム比など古気候のよい指標となる化学成分の探索が可能である。サンゴ礁の分析から、エルニーニョと沖縄の気候の関係などが明らかになるなど、サンゴ礁は地球環境変動の指標になっている。

1. 5 サンゴ礁の漁場機能と価値

1) サンゴ礁の漁場としての機能

サンゴ礁はさまざまな生物の繁殖・成育・索餌場であり、水産生物の資源涵養の場である。サンゴ礁に囲まれている沖縄県では、伝統的に一本釣、延縄、小型定置網、潜水漁業、追い込み網漁、刺し網、採貝などの漁業やモズク、ヒトエグサ、タカセガイやシャコガイなどの養殖業が行われている。独特な漁法である追い込み網や電灯潜り漁では、タカサゴ類、ブダイ類、ハタ類、タコ、イカ、シャコガイなどの貝類などが漁獲されている。典型的なサンゴ礁漁業では、魚類だけでも200～300種が漁獲され、温帯域に比べて魚種が多いことが特徴である（図 I. 1-15、図 I. 1-16）。



図 I. 1-15 サンゴ礁で漁獲される色彩豊かな魚介類



イノーの魚垣（ナガキイ）



追い込み網



電灯を用いた素潜り漁

図 I. 1-16 サンゴ礁域での伝統的漁法

(1) サンゴ礁海域の魚類相

サンゴ礁海域では、サンゴが生息しない砂地などに比べ、多様な魚類群集が形成されていることが一般的に知られている。その魚類群集の主要構成種は、スズメダイ類、ベラ類、チョウチョウオ類、ニザダイ類、ブダイ類、イソギンポ類、ハタ類などである。サンゴは極めて多様な魚種を育てており、その一部が漁業を通じて利用されている。

サンゴ礁に生息する魚介類はサンゴ食性、プランクトン食性、藻食（植食）性、肉食性などが複雑な食物連鎖を形成しているが、このうち水産上の主な有用魚介類についての食物連鎖を図 I. 1-17 に示す。動物プランクトンを食べる魚種は、タカサゴ類、アイゴの稚魚、キビナゴ類などである。また、食物連鎖の上位に位置する魚介類はアオリイカやスジアラ、ハマフエフキなどであり、小魚やサンゴに依存して生息するエビ・カニ類などの小動物を餌として利用する。つまり、食物連鎖のピラミッドの底辺を構成するサンゴ依存の小動物の存在が肉食性魚介類の生産を支えている。また、アイゴ類、イスズミ類、ブダイ類の多くはサンゴ礁に生育する藻類を食べ、ブダイ類のなかにはサンゴを直接餌として利用しているものもいる。

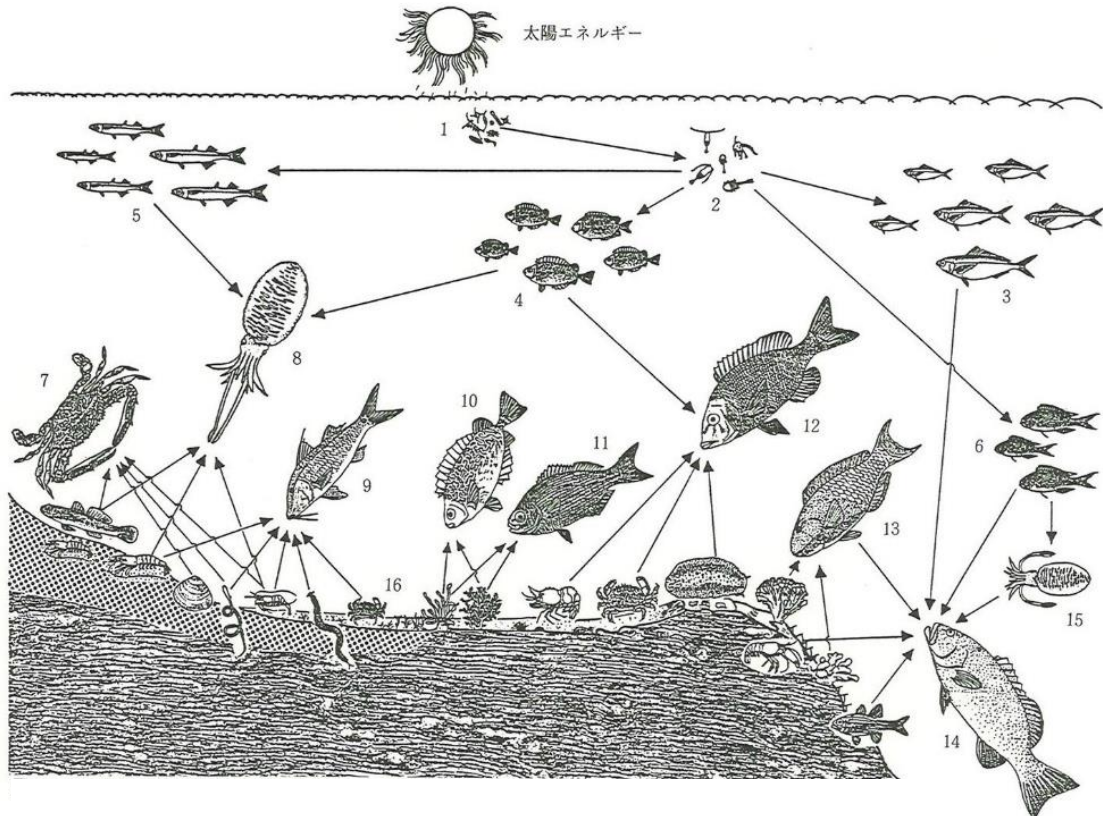


図 I. 1-17 サンゴ礁海域の有用魚介類を中心とする食物連鎖

(諸喜田 1988)

1. 植物プランクトン
2. 動物プランクトン
3. タカサゴ類 (グルクン)
4. アイゴ類の稚魚 (スク)
5. キビナゴ類
6. スズメダイ類
7. タイワンガサミ
8. アオリイカ
9. ヒメジ類
10. アイゴ類
11. メジナ類
12. ハマフエフキ (タマン)
13. イロブダイ
14. スジアラ (アカジン)
15. イカ類
16. その他底生生物

(2) サンゴと魚類との関係

サンゴと魚類との関わり方について、①サンゴを餌として利用する魚類、②サンゴがつくりだす立体的構造を生息場や餌場として利用する魚類という2つに大別することができる。

①サンゴを餌として利用する魚類

サンゴはそれ自身が魚類の餌となっている。佐野（1995）は、沖縄県のサンゴ礁域で採集した155種の魚類のうち、サンゴを専食していた魚（サンゴ食魚）は16種（約10%）、サンゴを餌の一部としていた魚は10種（約6%）で、全体の約16%がサンゴを餌としていたことを報告している。また、西表島の樹枝状ミドリイシ類からなるサンゴ群集域での調査でも、全確認種の21%、全確認個体の29%がサンゴを餌としていたことを報告している。チョウチョウオの仲間などの多くのサンゴ食魚類は、サンゴ枝を突っついたり、その表面をかじったりして、サンゴの粘液やポリプのみを食べるが、コクテンフグやブダイの仲間等は、くちばし状の歯で、サンゴ枝の先端部を5mmぐらい切り取って、骨格ごと飲み込むことも知られている（図I.1-18）。



ミスジチョウチョウオ（上）、シテンチョウチョウオ（下）



オニハゲブダイ

図 I.1-18 サンゴを餌として利用する魚類

②サンゴがつくりだす立体的構造を生息場や餌場として利用する魚類

サンゴによって形成される立体的構造が魚類の生息空間として利用されることが知られている。佐野（1995）は、西表島の樹枝状サンゴ群集域と対照区として砂地に対照域を各20 m²設けて調査し、サンゴ群集域では平均27種、155個体の魚類が生息していたのに対し、砂地では4種、6個体と圧倒的に少なかったと報告している。

また、サンゴ礁が魚類に対して果たしている役割を表I.1-4に示す5つに区分し、種類数は「採餌場・ねぐらグループ」や「採餌場・隠れ家グループ」が、個体数では「隠れ家グループ」が多いとしている。これらの結果から、サンゴ骨格の複雑な構造は餌となる小動物に対する微細な住み場所や藻類に対する付着基盤を提供するため、多くの餌生物が生息可能であり、サンゴ骨格の立体構造は魚類の生息場所形成において不可欠な存在となっているとしている（図I.1-19）。加えて、海底に堆積した死サンゴ（サンゴガラ）には多くの付着生物が蟄集することが知られており、水産庁が実施した調査では、サンゴガラを実海域に設置した8か月後には「216g/m²」もの付着生物が確認された（水産庁，2020）。

このように、サンゴ礁は多くの小動物や小型魚類に餌や隠れ場を提供し、食物連鎖の高次に位置する魚食性の大型魚類が小型魚類を求めてサンゴ礁に集まることにより、水産機能が発揮されている。

表 I.1-4 サンゴの利用タイプからみたカテゴリー分け

区 分	特 徴	魚 種
採餌場・隠れ家グループ	常にサゴ枝の間やその近くにおいて、危険が迫るとすぐにサゴの基部に逃げ込む。活動範囲は狭く、採餌場は隠れ家の中やその周辺にあり定住性が強い種類	スズメダイ類の多く、イキボ類、ハゼ類などの小型魚、中型のウツ類
採餌場・ねぐらグループ	昼間はサゴ群集域の広い範囲を移動しながらサゴ枝に住む魚類を含めた小動物や藻類を食べ、夜になるとサゴ枝の間や基部等で寝る種類	ブダイ類、ニザダイ類、アゴ類、ペラ類（ニシペラ属、クビペラ属、フノウ属）、チョウチョウ類、ハラガヤ
採餌場グループ	サゴ群集域の広い範囲をそこに棲む小動物を食べながら泳ぎ周り、夜はサゴ群集域以外（砂中）で寝る種類	カサハラ属やキュウセン属などの中型のペラ類
隠れ家グループ	サゴの少し上に定住し、流れてくるプランクトンなどを食べているが、危険がせまるとすぐにサゴの間に逃げ込む種類	サゴ枝に棲んでいない生物を主な餌とする定住性が強い魚で、ネタイズメダイやミジリウキウスメダイなどのスズメダイ類の一部を含む
ねぐらグループ	昼間はサゴ礁上の中層や表層を広い範囲に遊泳し、動物プランクトンを食べるが、夜になるとサゴの間や基部で寝る種類	デバスズメダイなどのスズメダイ類の一部の成魚

佐野（1995）をもとに作成



サンゴ礁の隙間に隠れるアオノメハタ



サンゴ礁内を遊泳するナンノウカイワリ

図 I.1-19 サンゴ礁を生息場や餌場として利用する魚類

2) 水産業への影響

サンゴ礁海域に生息する魚類を多く漁獲する沖縄県の漁獲量は年々減少しており、サンゴ礁の衰退との関係が指摘されているところである。図 I.1-20 に沖縄県のサンゴ礁域の主な魚介類の漁獲量の経年変化を示す。なお、平成 19 年（2007 年）から取得情報の分類が変わり、継続して推移の分かる貝類やタコ類等においては平成 27 年までの変化を示している。これによると、ほとんどの種で漁獲量は減少傾向にある。平成 18 年（2006 年）の漁獲量を昭和 61 年（1986 年）の漁獲量と比べると、漁獲量の多い「その他のタイ類（ハマフエフキやその他）」は約 20%に、「ブダイ類」は約 40%に落ち込んでいる。特に、タカサゴ類（地方名；グルクン）は昭和 56 年（1981 年）には 1200 トン以上あった漁獲量が、平成 17 年（2005 年）には 200 トン強に減少した。これは、最近のサンゴ礁の荒廃による

影響と乱獲による水産資源の減少（例えば、鹿熊 2004）が原因とされている。

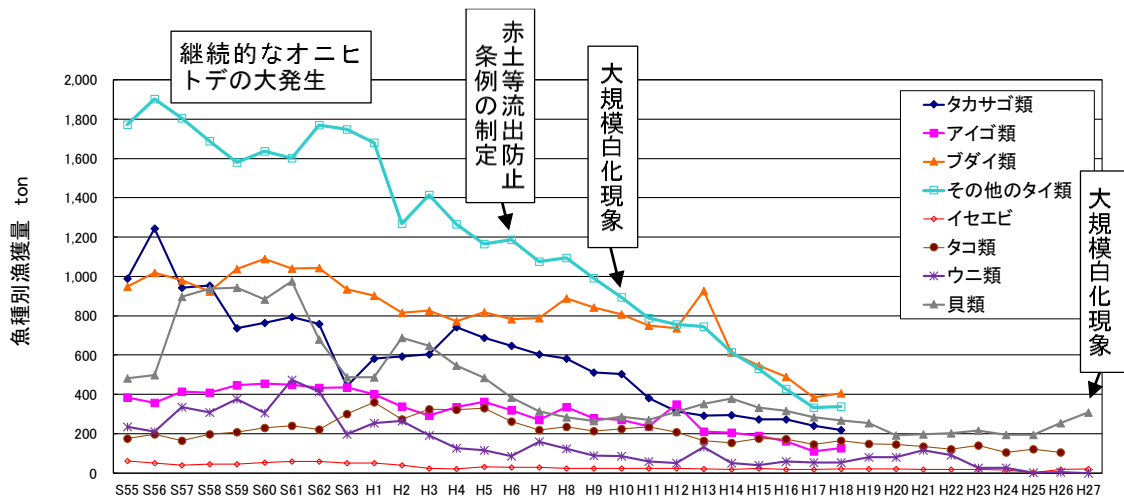


図 I.1-20 サンゴ礁域の主な魚介類の漁獲量推移
内閣府沖縄総合事務局農林水産部(2017)等 をもとに作成

(1) サンゴの減少と魚類との関わり

佐野（1995）は、西表島で樹枝状サンゴ群集域とオニヒトデの食害によりサンゴのつくりだした立体的構造が減少した場所で魚類相を比較している。これによると、立体的構造が部分的に壊れた状態では魚の種類数は65%、個体数は30%に減少し、立体的構造が完全に消滅した状態では生息する魚類の種類数はサンゴが生きていた時の28%に、個体数は8%に減少したと報告している（表 I.1-5）。久保らによって生体サンゴと死サンゴに蟄集する魚類量を調査した結果（未発表，1995）においては、死サンゴでは「20g/m²」程度であったのに対して、生体サンゴにおいては「約 470g/m²」もの魚類が確認された。このことから、サンゴの減少は生息する魚類の種数、個体数の減少をもたらす、特に多くの種類からなるサンゴ群集が作る立体的構造が崩壊した後は魚類の種数や個体数の減少が一層顕著になることを明らかにした。

つまり、サンゴの減少は漁獲対象魚種の減少につながり、漁業にも決定的な影響を与えるとと言える。

表 I.1-5 樹枝状サンゴの生死および死亡後の崩壊の程度と魚類の種類及び個体数の関係

	サンゴが生きている状態	サンゴが死滅し部分的に立体的構造が崩壊	サンゴが死滅し完全に立体的構造が崩壊
魚の種類/20m ²	34.6 (100%)	22.6 (65%)	9.8 (28%)
魚の個体数/20m ²	218 (100%)	66.4 (30%)	18.4 (8%)

注) () 内の数値はサンゴが生きている状態での種類数、個体数に対する割合を示す。

佐野(1995)をもとに作成

(2) サンゴの減少と漁獲量の関係

沖縄県の漁業を種類別に分類すると、①遠洋・近海・沿岸を漁場とするカツオ・マグロ

を対象とする一本釣、延縄漁業、②サンゴ礁外の大陸棚で営まれる曳縄（カツオ・マグロ）、延縄漁業（マチ類等）とソデイカを対象とする沿岸イカ釣漁業、③サンゴ礁の礁斜面及びサンゴ礁域で営まれる刺網、一本釣、大型定置網漁業、④主としてサンゴ礁域で営まれている敷網、小型定置網、採貝、採藻、建干網、追込み網、潜水器、その他の漁業の4つに大別できる。①、②はサンゴ礁の生態系とは独立しているのに対し、③と④の漁業はサンゴ礁と深く関わる漁業である。

サンゴの大規模白化が起こった 1998 年前後 3 年間の漁場区分別の年平均生産量を表 I.1-6 に示す。沖縄県の総漁獲量は年々減少の一途を辿っているが、中でもサンゴ礁域周辺での漁業生産の減少が著しい。サンゴ礁の縁辺部やサンゴ礁内での漁業の割合は、全漁獲量の 1/4 程度を占めているが、大規模白化後の生産量は大きく落ち込み、漁業生産全体に占めるシェアも低下している。

表 I.1-6 サンゴ礁海域の主な魚介類の漁獲量推移（沖縄県）

漁場区分	3ヶ年の平均生産量(トン)			割合(%)		
	92～94	98～00	04～06	92～94	98～00	04～06
1. カツオ・マグロ漁業	14,308	9,747	9,612	52	44	52
2. リーフ外の漁業	5,552	6,249	4,737	20	28	26
3. 準サンゴ礁の漁業	3,422	2,684	1,816	12	12	10
4. サンゴ礁の漁業	4,459	3,277	2,322	16	15	13
合計	27,762	21,958	18,487	100	100	100
3～4の合計	7,881	5,960	4,138	28	27	22

内閣府沖縄総合事務局農林水産部(2010)等をもとに作成

以上のとおり、サンゴの減少は、魚類の餌や魚類自体の減少をもたらし、さらにはサンゴ礁の立体的構造が消滅することにより、その減少がより一層顕著になることが伺える。それに伴い、サンゴ礁周辺での漁獲量も減少し、水産業に決定的な影響を与えることが指摘されており、水産振興の観点からもサンゴ礁の保全・再生が強く求められている。

3) サンゴ礁の価値

サンゴ礁の多様な機能に対して、それらの価値を定量的に評価する試みがなされている。サンゴ礁の価値を分類すると利用価値と非利用価値に大別され、利用価値はさらに、漁業、観賞魚の漁獲、建設資材（石灰岩や砂）、観光（ダイビング、海水浴、エコツアー等）などの直接利用価値と、海岸保護や漁業生産の基盤となる生態系の維持などの間接利用価値に分類される。これらの価値は比較的試算が容易であり、様々な試算がなされている。Cesar et al. (2003) は、世界のサンゴ礁がもたらす経済的利益について、年間約 298.3 億ドル、日本のサンゴ礁で年間約 16.7 億ドルと試算している（表 I.1-7）。

また、環境省では国内のサンゴ礁保全の推進のため、行動計画を策定しており、現在は「サンゴ礁生態系保全行動計画 2022-2030」が進められている。最初に策定された「サンゴ礁生態系保全行動計画」（環境省 2010）の中では、日本のサンゴ礁域（沖縄、奄美、小笠原）を対象に経済的価値を試算しており、年間で「観光・レクリエーション」2,399 億円、「漁業（商業用海産物）」107 億円、「海岸防護機能」75.2 億～839 億円と試算している。

水産庁では石西礁湖内にサンゴ増殖基盤を 190 基設置する仮想プロジェクト（図 I. 1-21）を実施した場合の直接利用価値における費用対効果を試算した（水産庁，2022）。その結果、漁業関連便益に絞った場合には評価期間中の総便益は 1.30 億円、B/C は 1.3、観光等による施設利用便益も加えた総便益は 2.14 億円、B/C は 2.1 であった。

表 I. 1-7 地域ごとのサンゴ礁の潜在的年間純利益と正味現在価値（単位：100 万米ドル）

	東南アジア	カリブ海 (米国を除く)	インド洋	太平洋 (米国を除く)	日本	米国	オーストラリア	世界
サンゴ礁面積(km ²)	89,000	19,000	54,000	67,000	3,000	3,000	49,000	284,000
漁業	2,281	391	969	1,060	89	70	858	5,718
沿岸の保護	5,047	720	1,595	579	268	172	629	9,009
観光業/レクリエーション	4,872	663	1,408	269	779	483	1,147	9,621
生物学的価値	458	79	199	172	529	401	3,645	5,483
合計	12,658	1,853	4,171	2,079	1,665	1,126	6,278	29,830
NPV(3%で)	338,348	49,527	111,484	55,584	44,500	30,097	167,819	797,359

Cesar et al. (2003) をもとに作成

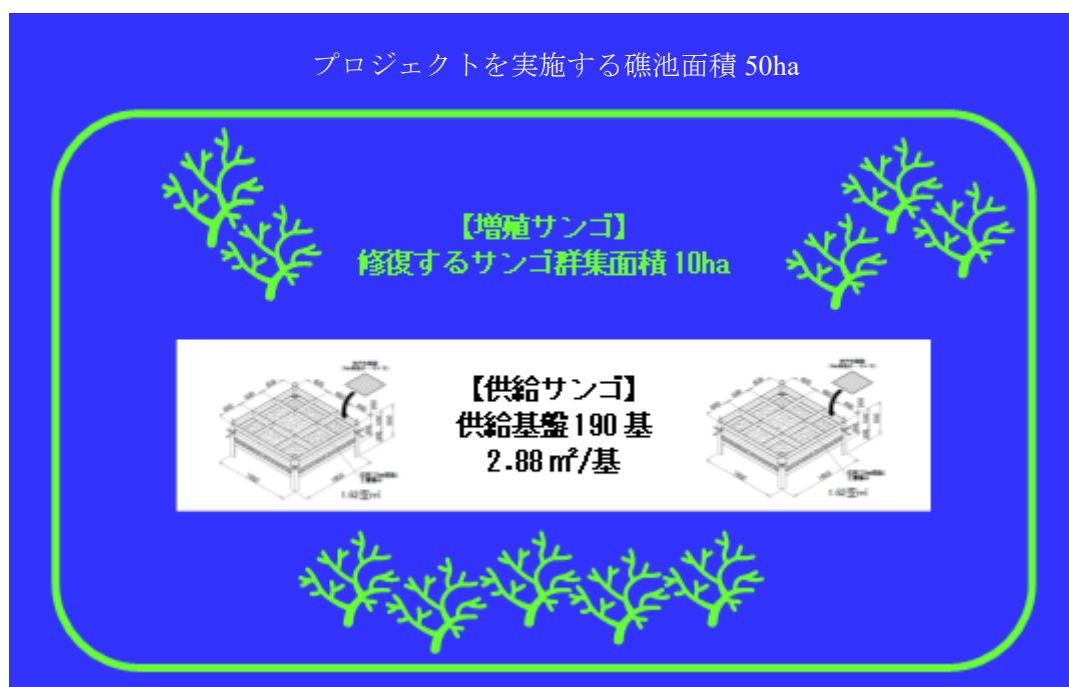


図 I. 1-21 水産庁による試算のプロジェクトイメージ

一方、非利用価値は、子孫に残す遺産価値や美しい景観、貴重な生態系が存続する存在価値がある。NGO などの多くの寄付は遺産価値であり、サンゴ礁で行われている祭事などは存在価値になる。これらの価値は一般的には試算しにくい。呉（2008）は、2002 年に慶良間諸島、恩納村、那覇市内でアンケート調査を行い、サンゴ礁の非利用価値を仮想評価法（CVM）により試算しており、日本のサンゴ礁は 3 千億円以上の非利用価値があると述べている。

1. 6 サンゴ礁の現状と保全・回復への取組

近年、地球温暖化やエルニーニョ現象等による大規模な白化現象、陸域からの排水や土砂流出等の人為的な影響、オニヒトデ等による食害による被害など、サンゴ群集の衰退が各地で深刻化している。特に白化現象においては、1997～1998年、2016～2017年、2024～2025年に世界規模で確認されており、その発生頻度が上昇傾向にある。

環境省では、2003年度より「重要生態系監視地域モニタリング推進事業（以下、「モニタリングサイト1000」という）を開始し、サンゴ礁生態系においても造礁サンゴ類を指標生物としてモニタリング調査を実施し、2013年度までの10年間の調査結果をとりまとめている。これによると、主なサンゴ礁域でのサンゴ被度は、白化現象、台風、オニヒトデの大発生等により減少傾向が認められ、その後もサンゴ被度は十分に回復していないことが報告されている（環境省 2015a）。

さらに、2016～2017年の世界的な海水温の上昇により、広範囲で大規模な白化現象が発生した。グレートバリアリーフでは、2年連続で白化現象が確認され、一部海域では全体の2/3が白化現象で死滅したことが報告されている（Hughes et al. 2017）。日本では、宮古島～西表島にかけての先島諸島でサンゴ被度の低下が顕著であり、モニタリングサイト1000の結果では、石西礁湖において平均白化率90%以上、死亡率2/3以上の調査結果が報告されている（図 I.1-22）。

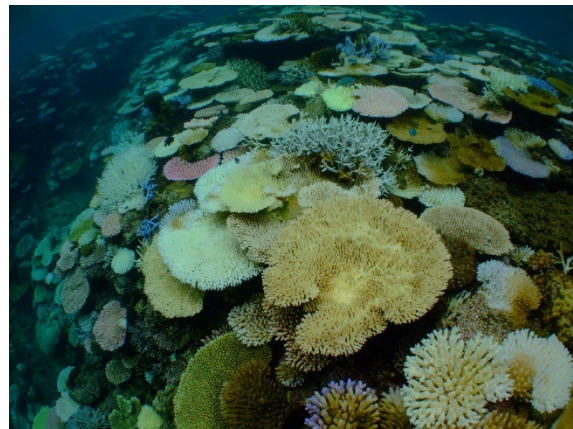


図 I.1-22 サンゴの白化現象

2024年も海水温の上昇により、大規模な白化現象が発生した。モニタリングサイト1000の結果では、特に石西礁湖での白化現象が顕著であり、全地点の平均白化率は89%、全地点で白化率が50%以上、死亡率は30%以上である調査結果が報告されている。

このように、サンゴ礁は地球温暖化による海面上昇や海水温の上昇などの地球規模で起こる環境ストレスに曝されている。加えて赤土の流入や海水の富栄養化などの地域的な環境ストレスが複合して作用するため、サンゴ礁は危機的な状況にある。以下に、サンゴ礁形成の阻害要因を示す。

1) 地球規模で起こる環境ストレス

(1) 高水温によるサンゴの白化現象

地球温暖化の影響により、高水温の発生する頻度が高くなり、高い海水温が継続するとサンゴに共生している褐虫藻が体内から喪失する。その結果、サンゴ自体の骨格が透けて、白く見えるサンゴの白化現象が起こる。さらに、この状態が長く続くとサンゴは褐虫藻から栄養を受け取ることができず、やがて死滅する。広範囲に及ぶサンゴの白化現象は、サンゴ礁の衰退を招く大きな原因の一つである。サンゴの白化現象は、高水温の他に低水温、強い光、紫外線、低塩分などの強いストレスが原因となることもある。

我が国では、1980年に初めて大規模な白化現象が観察され、その後、各地で頻繁に白化現象が発生している。近年では、1998年と2015～2016年にかけて起きた世界的な海水温

上昇に伴う大規模な白化が、サンゴ礁に大きな影響を及ぼした。

白化現象と高水温の閾値については、国内では平均水温が 30℃を上回ると白化する可能性が高いことが示されていた。近年では対象とする海域の過去の最暖月の水温を基準にして週積算高水温値 (DHW: Degree Heating Week) による評価が NOAA により提唱されている (Liu et al. 2006)。

(2) 台風の巨大化によるサンゴの破壊

台風が通過した後に、礁嶺に成育する大きなテーブル状のサンゴが根元から折れることがある。台風の巨大化により波高が増大すると、それに比例して波圧や流速が増大するため、今後、図 I.1-23 に示すようにサンゴの破壊が進行することが危惧されている。さらに、海面上昇によって多くの外洋の波浪エネルギーがサンゴ礁や海岸に到達するようになることが予想され、台風の巨大化とあいまって、サンゴ礁の破壊が進んで防災機能が損なわれることが危惧されている (Hongo et al. 2012)。

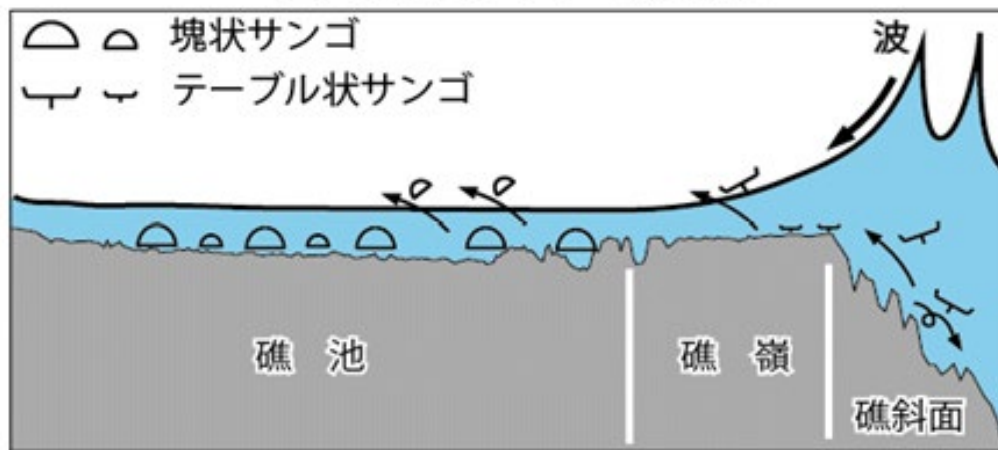


図 I.1-23 台風の巨大化によるサンゴ礁の破壊
Hongo et al. (2012)より作成

(3) 海洋の酸性化によるサンゴの衰退のおそれ

二酸化炭素の増加はサンゴ礁に大きな影響を与えるおそれがある。大気から海に取り込まれる二酸化炭素は、水と反応して pH を低下させ、アルカリ性 (pH8.1~8.2) から中性 (pH7) に近づく。この反応は「海洋の酸性化」と呼ばれている。「海洋の酸性化」は、石灰化に必要な炭酸イオン濃度を下げるため、炭酸カルシウムを主成分とするサンゴや有孔虫あるいは無節サンゴモなどの成長が阻害されるおそれがある (日本サンゴ礁学会 2011 等)。

「海洋の酸性化」は、一部の高緯度海域で数十年のうちに現れ始めると警告されている (Orr et al. 2005)。気象庁(2024)は、2023年の世界の二酸化炭素濃度の平均濃度は前年と比べて 2.3ppm 増えて 420.0ppm となっているとしている。今後、大気中の二酸化炭素が毎年 1ppm 以上上昇すると、100年以内に二酸化炭素濃度は 450~500ppm に達し、サンゴ礁の浸食が石灰化速度を上回ることが懸念されている (Kleypas・Langdon 2006)。

【コラム】白化指標としてのDHW（週積算高水温）の評価

NOAAは、衛星によって得られた海面水温データからDHWを求めて、これに基づいて白化の警告予報を出している。過去の大規模白化の記録とDHWとを比較して、DHWの白化指標としての有効性を検証した(Liu et al. 2006)。

DHWとは、当該海域において週平均海面水温が同海域の最暖月平均水温(=白化の閾値)を1°C以上超える週を対象に、週平均海面水温が最暖月平均水温を超過する値を12週間分積算した値(年間で積算値が最大となる連続した12週間を設定)である。DHWが4°Cを超えると白化が発生し、8°Cを超えると大規模な白化とサンゴの斃死が起こるとされる。

Kayanne (2017)は、北西太平洋の8地点(串本、高知、奄美大島、沖縄本島、石垣島、小笠原諸島、グアム、パラオ)を検証地点として、1982年から2015年までの大規模白化の記録とDHWとを比較した。その結果、これらの地点における大規模白化の年はDHWが8°C以上を超えており、白化とDHWは正の相関があることを確認した。

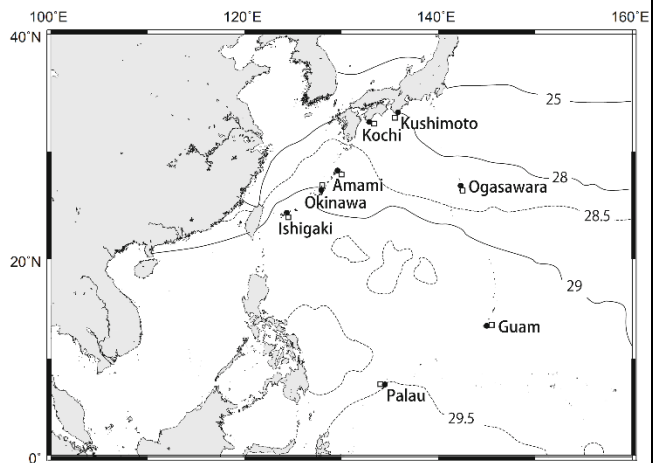


図1 検証地点および最暖月平均水温(°C)

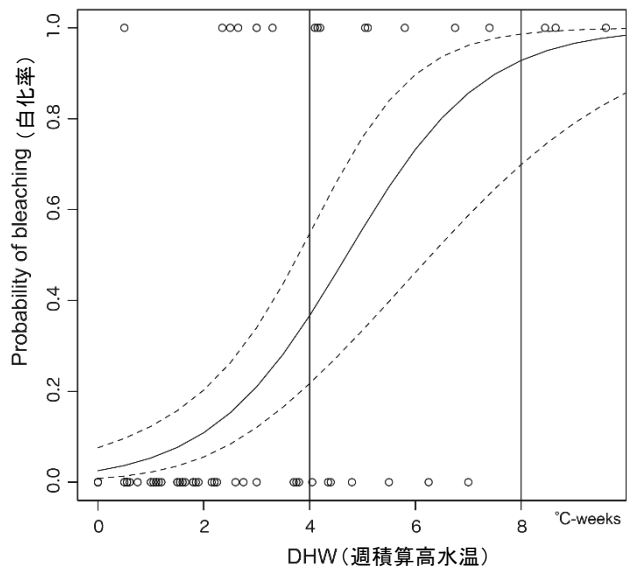


図2 1982~2015年におけるDHWと白化率の相関図

2) 地域的な環境ストレス

地球規模の環境ストレスに対して、地先のサンゴ礁では表 I.1-8 に示すような地域的な環境ストレスが考えられる。

表 I.1-8 地域的な環境ストレス

ストレス	概要
食害生物の増加	食害動物（オニヒトデやシロレイシガイダマン類など）の増加によりサンゴの生残や成長が阻害される。特に、オニヒトデの大発生は広い範囲でサンゴの死滅をもたらす。
サンゴの加入量不足	白化現象や食害により、親サンゴが広範囲に死滅すると、海域の総産卵量が減り、受精の機会が減ってしまうため、サンゴ幼生が不足し、新規加入が難しくなる。
海藻類の増加	植食動物（アイゴ、タカセガイなど）の減少や海中の富栄養化が原因で、海藻や微細藻類が繁茂し、基盤を優占するとサンゴ幼生の加入が阻害される。
瓦礫の移動によるサンゴの破壊	波によりサンゴ瓦礫が大きく移動する海底では、サンゴ瓦礫が海底を摩耗するため、サンゴ幼生の加入を阻害したり、サンゴを破壊したりする。
透明度の低下と浮泥の堆積	汚濁河川水の流入により、濁りが透明度を低下させ、長期にわたって光量不足が続くと成長が阻害される。また、浮泥の堆積は、サンゴ幼生の加入や成長を阻害する。
赤土の流入	赤土の流入は、濁りで透明度を低下させ、長期にわたって光量不足が続くと、サンゴの成長が阻害される。また、赤土の堆積はサンゴのへい死をもたらす。
富栄養化	農地からの肥料や畜産ふん尿、あるいは生活雑排水が流入し、富栄養化した海中では、基盤上に海藻類が繁茂し、サンゴ幼生の加入や成長を阻害することがある。また、植物プランクトンが増殖して透明度が低下し、サンゴの成長が阻害される。
過剰な観光利用・乱獲	海水浴やマリンスポーツは、故意ではなくても踏みつけやフィンなどでサンゴを折損・破壊することがある。また、乱獲による水産生物の減少は、サンゴ礁の生態系に影響を与え、例えば、藻食性魚類が乱獲によって減れば、海藻類が増えて、サンゴが減少することがある。
サンゴの病気	近年、いろいろなストレスで弱ったサンゴにブラックバンドディーズ（黒帯病＝細菌による壊死）やホワイトシンδροーム（サンゴの組織が帯状に白く壊死する病気）などの感染症や腫瘍（骨格形成異常）が広がっている。
カイメンによる被覆	被覆状のカイメンがサンゴを覆いつくし、広範囲かつ急速なサンゴの死滅を引き起こす。

(1) 食害生物の増加

サンゴの食害生物としてはオニヒトデ、シロレイシガイダマシ類、ブダイ類の一部、ガンガゼなどが代表的である。その中でも、オニヒトデやシロレイシガイダマシ類の大発生はサンゴ礁に大きな影響を与える（日本サンゴ礁学会 2011 等）。

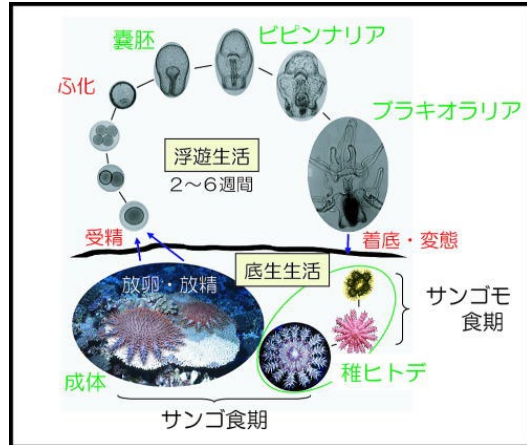
● オニヒトデ

太平洋やインド洋に分布し、大きいもので直径 50cm 位になる。腕は 13～15 本あり、背面は棘で覆われ、体色は灰色・オレンジ色・紫色で棘の先端は赤色。6～7 月に産卵し、受精後、海面近くを浮遊幼生として数週間ほど漂い、着底後にヒトデ型に変態する。稚ヒトデは死サンゴ礫上のサンゴモ（石灰藻）等を餌料とし、直径 8～10mm に成長するとサンゴを捕食ようになる。寿命は 6～8 年。摂食時は口から胃を出して裏返しに広げてサンゴに押し付け、消化吸収する。1 匹で 1 年に 5～13 m² のサンゴを食べる。天敵はホラガイ、フリソデエビ、フグの仲間、モンガラカワハギ等である（図 I.1-24）。

沖縄県では、1970 年代に大発生し、1970 年代末には沖縄本島のサンゴ礁がほぼ全滅した。1990 年代に入ってしばらくはオニヒトデが減少し、サンゴが回復する兆しがみられたが、2000 年から 2006 年頃に再びオニヒトデが増加し、八重山諸島を含めて全域で食害による被害がみられた。オニヒトデの大発生の原因は明らかではないが、自然発生説と人為的な要因で沿岸域に流出した過剰な栄養塩がオニヒトデ幼生の餌となる植物プランクトンを増やし、結果としてオニヒトデの大発生につながるという説が有力である。また、オニヒトデ幼生の捕食者（魚類）の減少が一因とも考えられている。



オニヒトデによるサンゴの捕食



オニヒトデの生活史
横地(2004)

図 I.1-24 オニヒトデ

● シロレイシガイダマシ類

シロレイシガイダマシ類は、時折大発生してサンゴに被害を与える巻貝である。殻長は 4cm 以下で、多くは本州中部以南のサンゴ生息域に分布する。この種は歯舌によってサンゴの軟組織を掻き取るように食べる。これまで、東京都の三宅島、宮崎県の日南海岸、四国の足摺・宇和海、長崎県の天草などで大発生してサンゴに被害を与えている。琉球列島でもシロレイシガイダマシ類の食害が報告されているが、オニヒトデのような広範囲にわ

たる被害には至っていない（図 I.1-25）。

シロレイシガイダマシ類は分散して生息するのではなく、サンゴの 1 群体に数個から十数個が集団となって分布し、大発生すると 1 群体に数千個の貝が蝟集する。食害や外傷によるストレスを受けたサンゴが分泌する粘液に誘引される（谷口 2005）。

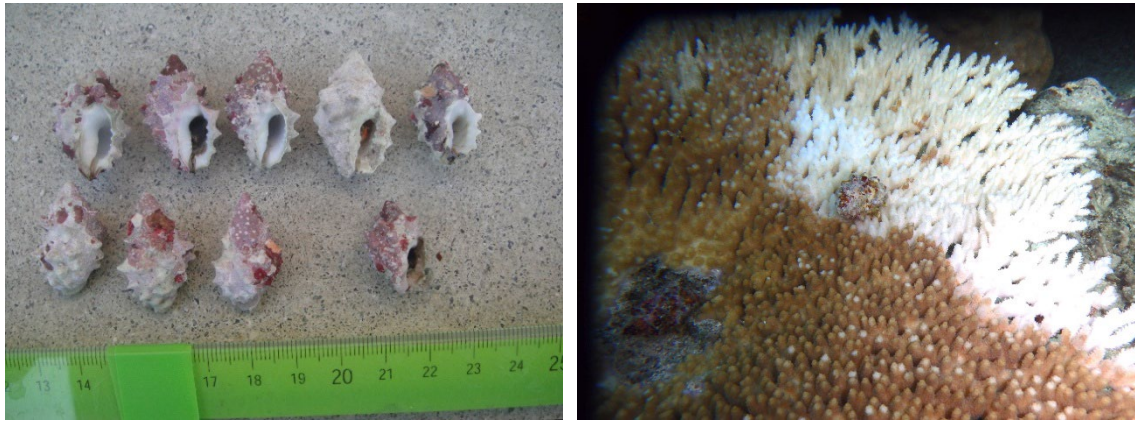


図 I.1-25 シロレイシガイダマシ類とその食害によるサンゴの白化



図 I.1-26 その他の食害動物（左：ブダイ、右：ガンガゼモドキ）

(2) サンゴの加入量不足

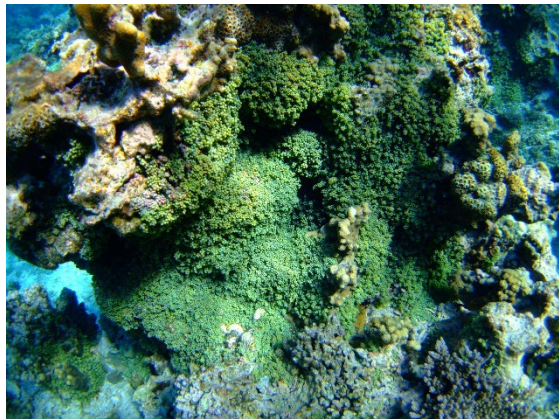
白化現象や食害により親サンゴが広範囲に死滅すると、海域の総産卵量が減り、受精の機会が減ってしまうため、サンゴ幼生が不足し、新規加入が難しくなる（日本サンゴ礁学会 2011 等）。

多くのサンゴは同じ種で違う親から生まれた卵と精子が受精する。同じ親から生まれた卵と精子は受精しない。したがって、受精のためには同じ種の複数の親群体が近くにあって、それぞれの卵と精子が混じり合う必要がある。大規模な白化や食害で広範囲にサンゴが衰退するとサンゴ群体間の距離が広がり、群体間の有効な受精が期待されなくなる。受精率が低下すると、サンゴ幼生の新規加入量が減少し、サンゴ礁の回復が遅くなることが懸念される（大森・岩尾 2014）。

(3) 海藻類の増加

植食動物（アイゴ、タカセガイなど）の減少や海中の富栄養化が原因で、海藻や微細藻類が繁茂し、これらが基盤を優占するとサンゴ幼生の加入が阻害される。

サンゴが成育する岩礁には、イワズタ類やウミウチワ類、ホンダワラ類などの海藻も生育する。また、サンゴ群体がへい死すると、骨格上を覆うように生長の速いラン藻などが繁茂する。海藻類とサンゴは基盤を競合する関係にあるため、栄養塩濃度の高い河川水が豊富に流入したり、藻食性魚類が漁獲されて数を減らしたりした場所では、海藻類が著しく増えて基盤面を覆い、サンゴ幼生の加入や成長を阻害することがある（日本サンゴ礁学会 2011 等）（図 I.1-27）。



イワズタ類



ホンダワラ類



ウスキウチワ



マット状に岩面を覆うラン藻

図 I.1-27 サンゴ礁に分布する藻類

(4) 瓦礫の移動によるサンゴの破壊

激浪時の漂砂がサンゴ幼生の加入や成長を阻害することが知られている（安藤ほか 2009 等）。死んだサンゴの骨格は、強い波や流れなどによって次第に崩壊し、瓦礫となって海底に溜まる（図 I.1-28）。海底近くに着生、成育したサンゴは、砂やサンゴ瓦礫の移動・衝突によって、壊れたり擦られたり、あるいは、砂に埋没して成長が阻害されることがある（図 I.1-29）。



図 I . 1-28 サンゴの瓦礫



図 I . 1-29 砂に埋没したサンゴ

(5) 透明度の低下と浮泥の堆積

サンゴに共生する褐虫藻は、光合成産物をサンゴに提供している。しかし、濁った河川水の流入や海域の富栄養化によって、海水中の懸濁物が増えると透明度が低下し、褐虫藻の光合成が阻害されて、サンゴの成長が阻害される。また、サンゴの上に積もった浮泥をサンゴは触手や粘液で払拭するが、それにエネルギーを消耗し、摂餌の機会が減少するため、成長が阻害されることがある（山里 1991 等）（図 I . 1-30、図 I . 1-31）。



図 I . 1-30 透明度の低い海底の状況



図 I . 1-31 浮泥の堆積したサンゴ

(6) 赤土の流入

サンゴ礁の島々を覆う粘土質の酸性土壌（赤土）は、降雨時に農地や開発地域などから海へ流れ込むことがある。この粘土やシルト分が多い赤土は粒径が小さいため、水中での沈降速度が遅く、濁りが継続する。そのため、褐虫藻の光合成が阻害されて、サンゴの成長が阻害される。堆積した赤土は波浪によって懸濁することで影響を長期化させる。また、赤土がサンゴの上に堆積すると、サンゴの呼吸が妨げられ、へい死に至るとされている（土屋・藤田 2009 等）。

沖縄県では道路建設や農地の改良事業で赤土の流出が増加したため、1995年に「沖縄県赤土等流出防止条例」が施行された。大規模な開発事業からの流出量は、条例施行前の1993年の16.7万トン/年から2011年以降は約3万トン/年まで減少した。しかし、農地からの赤土流出量は、条例施行前の1993年の32.1万トン/年から条例施行後は減少しているものの2021年においても20.0万トン/年であり、依然として全体の約8割を占めている（図I.1-32、図I.1-33）。

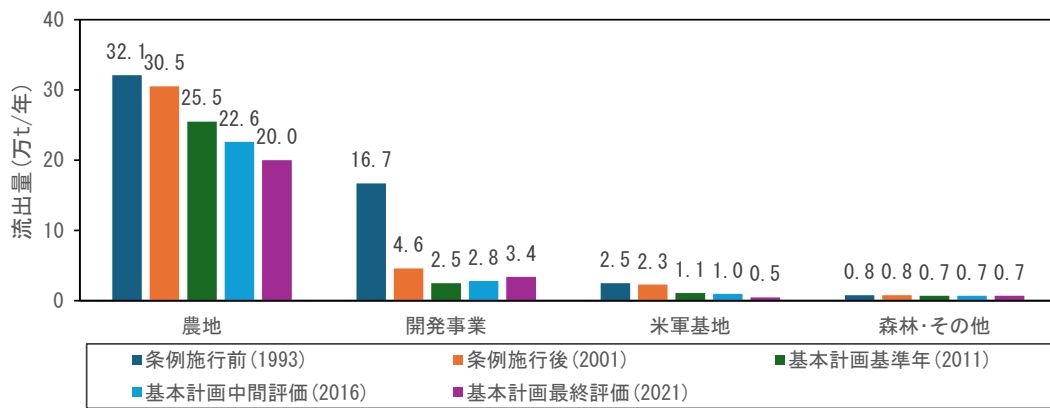


図 I . 1-32 赤土等の年間流出量の推定
沖縄県 (2023) をもとに作成



図 I . 1-33 赤土の流入状況

(7) 富栄養化

降雨が続くと農地の肥料や畜産業で発生するふん尿等から、窒素やリン等の栄養塩が海に流入することがある。また、生活雑排水も河川を通じて海に流入することがある。このような栄養塩濃度の高い水が海水交換の少ない湾や入江に流入すると、海水は富栄養状態へと移行する。サンゴ礁海域で富栄養化が進むと、着生場所を競合する海藻が優占し、サンゴが減少する傾向がある（日本サンゴ礁学会 2011 等）。また富栄養化条件ではサンゴの骨格形成が阻害される。

さらに富栄養化が進むと、海水中の植物プランクトンが大量に発生するなどして海水を汚濁するため、褐虫藻の光合成が阻害されて、サンゴの成長が阻害される。また、付着藻類が増殖しやすくなり、基盤にマット状の藻類が繁茂すると、サンゴ幼生の着生場所が不足する。仮に基盤上にサンゴ幼生が着生できたとしても、付着藻類に覆われて、サンゴの成長が阻害される。

(8) 過剰な観光利用・乱獲

海水浴やマリンレジャーは、故意ではなくてもサンゴを折損・破壊することがある。また、乱獲による水産生物の減少は、サンゴ礁の生態系に影響を与える。例えば、藻食性魚類が乱獲によって減ると海藻類が増えて、サンゴが減少することがある（日本サンゴ礁学会 2011 等）。

美しいサンゴ礁は、海水浴やマリンレジャーの場として利用されている。沖縄県の観光客は年間数百万人で、海水浴・マリンレジャー・ダイビング・釣などを楽しむ観光客はその 1/3 を占めている。ゴミの投棄、釣り餌の投棄、釣り糸の放置（図 I. 1-34）、サンゴ礁への立ち入り、遊泳による踏みつけ、不慣れたダイビングによるサンゴの折損、プレジャーボートの投錨によるサンゴの破壊（図 I. 1-35）等は、サンゴ礁に様々な悪影響を与える。

サンゴ礁の漁業資源は、健全なサンゴ礁生態系が維持されないと保てない。水産生物の乱獲はサンゴ礁の破壊に繋がる（日本サンゴ礁学会 2011）。特に、海藻を食べるブダイ、クロハギやハクセイハギ等を乱獲すると、海藻を繁殖させ、サンゴ礁の衰退の原因となる。ブダイ類の一部はサンゴの食害生物でもあるが、獲りすぎには注意が必要である。



図 I. 1-34 釣り糸が絡んだサンゴ



図 I. 1-35 投錨によるダメージ

サンゴ礁生態系に悪影響があると言われている漁法には、爆弾漁、シアン化合物漁、養殖、カゴ漁、追込網などがある。日本では爆弾漁やシアン化合物漁等の破壊的漁業は現在行われていない。また、カゴ漁はサンゴを折損することがあり、追込網もサンゴを破壊して魚を追い込むことがあるため、フィリピンやインドネシアでは禁じられている（鹿熊2007）。

(9) サンゴの病気

近年、黒帯病（ブラックバンドディジーズ＝細菌による壊死）やホワイトシンドローム（サンゴの組織が帯状に白く壊死する病気）などの感染症や腫瘍（骨格形成異常）が広がっている（日本サンゴ礁学会 2011 等）。

高水温や水質汚濁を原因とする指摘もあるが、実際の因果関係ははっきりしていないため、今後の研究が待たれる。日本で確認されている主な病気を表 I.1-9 に示す。

黒帯病は最も古くから確認されている病気である。サンゴの軟組織に細菌が侵入し、黒い帯状となるので容易に認識できる。また、ホワイトシンドロームはサンゴの体組織が壊死して剥がれ落ち、骨格が露出する病気で、病変部の拡大が速いのが特徴である。原因は解明されておらず、2003 年頃から石西礁湖や慶良間で確認されている。その他、ハマサンゴ類紅斑病は原生生物が原因の病気である。この病気によく似た色素沈着が、沖縄本島の備瀬の礁池などで確認されている（日本サンゴ礁学会 2011）。腫瘍は骨格が盛り上がり、褐虫藻の密度が低下するので判りやすい病気である。骨格が脆くなり生殖異常を起こすため病気とされている。慶良間や与那国では、特定のサンゴ種に大量に発症していることが報告されている（日本サンゴ礁学会 2011 等）（図 I.1-36）。

なお、種苗生産時には細菌性の感染症として Rapid tissue necrosis により稚サンゴの組織が壊死することがある。

表 I.1-9 我が国で確認されている主なサンゴの病気

疾病名	英名	略号	病因	罹患生物
黒帯病	Black band disease	BBD	細菌群	造礁サンゴ、八放サンゴ
ホワイトシンドローム	White syndrome	WS	不明	造礁サンゴ
ハマサンゴ類の紅斑病	Porites pink blotch disease	PPBD	原生動物	造礁サンゴ

日本サンゴ礁学会（2011）をもとに作成

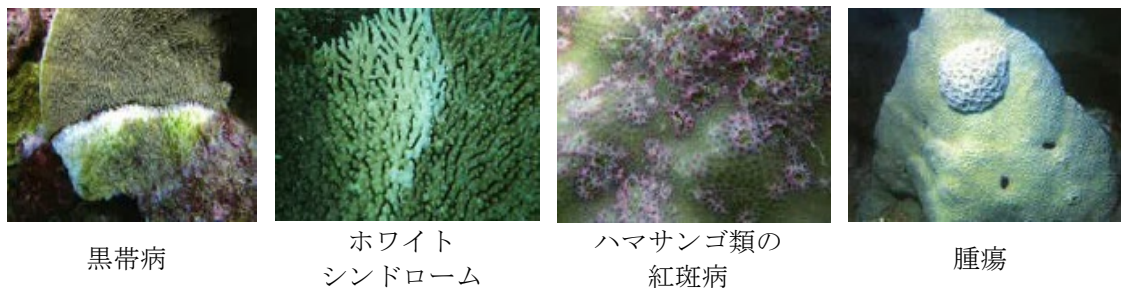


図 I.1-36 サンゴの病気 日本サンゴ礁学会（2011）

(10) カイメンによる被覆

強い空間占有能力を持つ被覆性のカイメン（テルピオス）は、サンゴと空間を巡る非常に強力な競争者である。テルピオスは灰色から黒色を呈し、1mm以下の薄い組織であるが、急速かつ広範囲にサンゴを覆うことで死滅させる。組織内に多数のシアノバクテリアを共生させており、共生シアノバクテリアは栄養面でテルピオスの成長を促進していると考えられている（Aini et al. 2021）。世界中で被害が報告されており、グアムでは長さ1000mに及び大規模な被覆が、日本では徳之島や沖永良部島で深刻な被害が報告された。

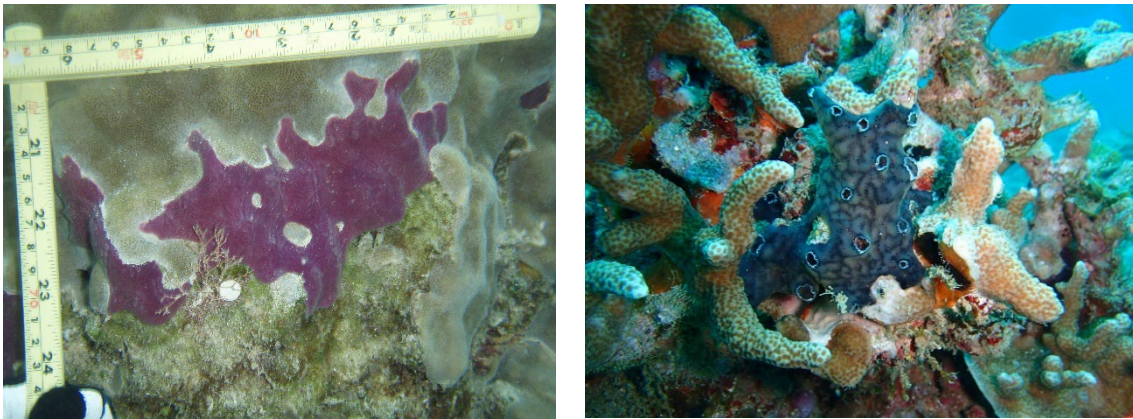


図 I.1-37 カイメンに被覆されているサンゴ

(11) 原因不明の死滅

群体性のサンゴは破片から再生することができるため、生理学的寿命は無限だと見做されることが多い。しかしながら強い波浪などで群体が基盤から脱落するといった環境要因によって死滅することがあり、生態学的寿命は有限である。生態学的寿命による死滅のペースと、新規加入からの成長のペースとが釣り合っている場合に、サンゴ群集は入れ替わりながら安定する動的平衡の状態となる。一方で、健全な群体に囲まれて環境悪化が考えられない状況の中で、食害または病気の兆候が見られないにも拘らず、原因不明の死滅あるいは部分的死滅となっている群体が頻繁に見つかる（図 I.1-38）。これも生態学的寿命の表れなのかもしれない。配偶子形成の過程で、染色体の不等配分による染色体数の増減や、不等交叉による遺伝子の増減や遺伝子の破壊は、常にある程度の頻度で生じる。このような遺伝的突然変異のために、受精から卵割の開始、受精卵からプラヌラ幼生への発生、プラヌラ幼生からポリプへの変態、ポリプの無性生殖による群体の成長といった各段階において、遺伝的（先天的）な不具合のために発育できず死滅する場合がありますと考えられるが、その出現率はまだ計測されておらず未知である。同様に、群体の成長途中で外的要因無しに死滅する個体やわずかな環境の違いへの適合性が異なる群体が生じることも想定されるが、その出現率もまた不明で、自然死の研究が必要である。移植した群体の追跡過程における原因不明の死滅やサンゴ種苗の初期減耗に対して、自然死が把握できていないことを踏まえて評価をする必要がある。

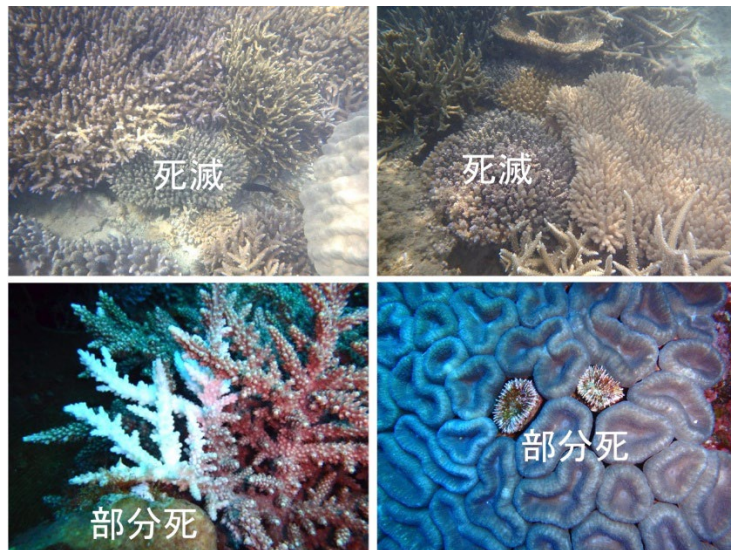


図 I. 1-38 原因不明に死滅・部分死したとみられるサンゴ

3) 新たな取組

近年の気候変動の影響によりサンゴ礁の衰退は著しく、保全・回復に向けた新たな取組が始まっている。

(1) 国の取組

気候変動による様々な影響に対し、政府全体として整合性のとれた取組を総合的かつ計画的に推進するため、2015年11月25日の第3回気候変動の影響への適応に関する関係府省庁連絡会議において、「気候変動の影響への適応計画（閣議決定案）」が取りまとめられ、「気候変動の影響への適応計画」が閣議決定された（環境省 2015b）。その後、適応の法制化が検討され、2018年6月13日に気候変動適応法が成立し、2018年12月1日に施行された。分野別に見ると、自然生態系の中でも沿岸生態系における基本的な施策として、農林水産省と環境省では、藻場・干潟・サンゴ礁域においてモニタリングを重点的に行うことと、必要に応じて保全・再生を行って生態系ネットワークの形成を推進することを示している。

(2) 環境省の取組

環境省では、2010年度に策定された「サンゴ礁生態系保全行動計画」を改訂し、2022年度以降のサンゴ礁生態系の保全のための行動計画として新たに「サンゴ礁生態系保全行動計画 2022-2030」を策定した（環境省 2022）。重点課題として、サンゴ群集に関する科学的知見の充実と継続的モニタリング・管理の強化、陸域から過剰に流入する赤土等の土砂及び栄養塩、化学物質等の負荷への対策の推進、サンゴ礁生態系における持続可能なツーリズムの推進、地域の暮らしとサンゴ礁生態系のつながりの構築があげられている。

2016年の石西礁湖の大規模な白化・衰退によるサンゴ礁の危機的状況を受けて2017年4月には「サンゴ大規模白化緊急対策会議」が開催され（環境省 2017）、白化の現状と白化対策に関する最新の知見を共有し、意見交換を通じて緊急宣言が取りまとめられている。

具体的な取組としては、環境省は 2006 年から石西礁湖自然再生協議会を支援して国内最大のサンゴ礁である石西礁湖のサンゴ礁再生に取り組んでいる。

(3) 水産庁の取組

水産庁では、水産基盤整備事業において、水産資源の生産力の向上とともに豊かな生態系の維持・回復を目指し、水産生物の生活史に対応した良好な生息環境空間の創出を図る漁場の整備等を実施している。また、2013 年からは水産多面的機能発揮対策事業として、藻場・干潟、ヨシ帯に加えてサンゴ礁についても環境・生態系保全を支援する活動を行っている。サンゴ礁の保全については、漁業者等が行うサンゴの種苗生産、サンゴの移植、食害生物の除去、保護区域の設定、浮遊・堆積物の除去、モニタリング等について支援が可能である。オニヒトデの駆除やサンゴの移植等の実績がある。

(4) 沖縄県の取組

沖縄県環境部自然保護課では、2011 年度から沖縄県サンゴ礁保全再生事業を実施しており、「面的広がりのあるサンゴ植付け」を目標として 2016 年度までに恩納村、読谷村、座間味村で合計 3.42ha の範囲に 15 万本以上のサンゴ種苗の植え付けを行った。

引用文献

- Aini SN, Tang SL., Yamashiro H (2021) Monthly progression rates of the coral-killing sponge *Terpios hoshinota* in Sesoko Island, Okinawa, Japan, Coral Reefs, 40, 973-981
- 安藤 亘・渡邊浩二・田村真弓・三宅崇智・北野倫生・山本秀一 (2009) サンゴ増殖基盤に必要な機能と構造に関する考察. 海洋開発論文集, 25, 461-466
- Bhattacharya D, Agrawal S, Aranda M, Baumgarten S, Belcaid M, Drake JL, Erwin D, Foret S, Gates RD, Gruber DF, Kamel Bishoy, Lesser MP, Levy O, Liew YJ, MacManes M, Mass T, Medina M, Mehr S, Meyer E, Price DC, Putnam HM, Qiu H, Shinzato C, Shoguchi E, Stokes AJ, Tambutte S, Tchernov D, Voolstra CR, Wagner N, Walker CW, Weber APM, Weis V, Zelzion E, Zoccola D, Falkoowski PG (2016) Comparative genomics explains the evolutionary success of reef-forming corals. eLife 5, e13288
- Cesar H, Burke L, Soeda LP (2003) サンゴ礁の世界的な衰退による経済への影響. WWF ジャパン, 23p
- Fisher R, O'Leary RA, Low-Choy S, Mengersen K, Knowlton N, Brainard RE, Caley MJ (2015) Species richness on coral reefs and the pursuit of convergent global estimates. Current Biology, 25, 500-505
- 深見裕伸 (2013) キクメイシ科およびオオトゲサンゴ科の分類体系の改変の理由. 日本サンゴ礁学会誌, 15, 107-113
- 深見裕伸 (2016) 分類と系統 有藻性イシサンゴ類における分類体系改変の現状. 生物科学, 67(4), 201-215
- 呉錫畢 (2008) 環境・経済と真の豊かさーテーゲー経済学序説ー. 日本経済評論社, 東京. 170p
- Harrison PL, Wallace CC (1990) Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. In "Coral reef ecosystems" Ed by Dubinsky Z, Ecosystems of the World, 25, Elsevier, 133-207
- 林原 毅 (1995) 慶良間列島阿嘉島周辺の造礁サンゴ類とその有性生殖に関する生態学的研究. 博士論文, 東京水産大学, 123p
- ホイタッカー RH (著)、宝月欣二(訳) (1979) 生態学概説. 培風館, 東京. 363p
- Hongo C, Kawamata H, Goto K (2012) Catastrophic impact of typhoon waves on coral communities in the Ryukyu Islands under global warming. Journal of Geophysical Research, 117, 1-14
- Hughes TP, Kerry JT, Álvarez-Noriega M, Álvarez-Romero JG, Anderson KD, Baird AH, Babcock RC, Beger M, Bellwood DR, Berkelmans R, Bridge TC, Butler IR, Byrne M, Cantin NE, Comeau S, Connolly SR, Cumming GS, Dalton SJ, Diaz-Pulido G, Eakin CM, Figueira WF, Gilmour JP, Harrison HB1, Heron SF, Hoey AS, Hobbs JA, Hoogenboom MO, Kennedy EV, Kuo CY, Lough JM, Lowe RJ, Liu G, McCulloch MT, Malcolm HA, McWilliam MJ, Pandolfi JM, Pears RJ, Pratchett MS, Schoepf V, Simpson T, Skirving WJ, Sommer B, Torda G, Wachenfeld DR, Willis BL,

- Wilson SK (2017) Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543, 373-377
- 鹿熊信一郎 (2004) 4-4 漁業. 日本のサンゴ礁, 環境省, 122-126,
<https://www.env.go.jp/nature/biodic/coralreefs/reference/mokuji/0404j.pdf>
- 鹿熊信一郎 (2007) 東南アジアにおける破壊的漁業と養殖ーサンゴ礁保全とサンゴ礁漁業・養殖の両立をめざしてー. *地域漁業研究*, 47(1), 137-160
- 環境省 (2010) サンゴ礁生態系保全行動計画, 豊かな地域社会を実現する健全な自然環境の継承を目指して. 22p,
<http://www.env.go.jp/nature/biodic/coralreefs/pdf/project/development/keikaku.pdf>
- 環境省 (2015a) モニタリングサイト 1000.
<http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/index.html#2464>
- 環境省 (2015b) 気候変動の影響への適応計画.
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/tekiou/siryou.pdf>
- 環境省 (2016) サンゴ礁生態系保全行動計画 2016-2020.
https://www.env.go.jp/nature/biodic/coralreefs/pamph/C-project2016-2020_L.pdf
- 環境省 (2017) サンゴ大規模白化緊急対策会議.
<http://www.env.go.jp/press/104002.html>
- 環境省 (2025) 2024 年度西表石垣国立公園石西礁湖及びその近隣海域におけるサンゴ礁モニタリング調査報告書
https://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/2024_IriomoteIshigaki.pdf
- Kayal E, Roure B, Philippe H, Collins AG, Lavrov DV (2013) Cnidarian phylogenetic relationships as revealed by mitogenomics. *BMC Evolutionary Biology*, 13(5)
- Kayanne H (2017) Validation of degree heating weeks as a coral bleaching index in the northwestern Pacific. *Coral Reefs*, 36, 63-70
- 茅根 創・本郷宙軌・山野博哉 (2004) サンゴ礁の分布, 日本のサンゴ礁, 環境省, 15-21
- Kimble M (2002) Coral jewels.
<https://www.ourplanet.com/imgversn/142/kimble.html>
- 気象庁 (2024) 大気中二酸化炭素濃度の経年変化.
http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
- Kleypas JA, Langdon C (2006) Coral reefs and changing seawater chemistry. In: Phinney JT, Hoegh-Guldberg O, Kleypas J, Skirving W, Strong A (eds) *Coral reefs and climate change: science and management*. AGU Monograph Series, Coastal and Estuarine Studies, 61, 73-110
- 久保弘文・謝名堂聡・比嘉義視 (2015) 養殖サンゴの生体及び死滅体への蝟集動物とその生態的意義. 日本サンゴ礁学会第 18 回大会講演要旨集
- Liu G, Strong AE, Skirving WJ, Arzayus LF (2006) Overview of NOAA coral reef watch

- program's near-real-time satellite global coral bleaching monitoring activities. Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, 1783-1793
- 目崎茂和 (1988) 石垣島・白保 サンゴの海. 高文研, 東京. 142p
- 本川達雄 (2008) サンゴとサンゴ礁のはなし. 中公新書, 東京. 273p
- 灘岡和夫・Enrico CP・山野博哉 (2004) サンゴ礁のリモートセンシング. 日本のサンゴ礁, 環境省, 95-106
- 内閣府沖縄総合事務局農林水産部 (2010) 沖縄農林水産統計年報. 平成 22 年 3 月,
<http://ogb.go.jp/nousui/statistics/nenpo/38jinenpo.pdf>
- 内閣府沖縄総合事務局農林水産部 (2017) 沖縄農林水産統計年報. 平成 29 年 3 月,
<https://www.ogb.go.jp/nousui/toukei/007573.html>
- 中嶋亮太・田中泰章 (2014) サンゴ礁生態系の物質循環におけるサンゴ粘液の役割-生物地球化学・生態学の視点から-. 日本サンゴ礁学会誌, 16, 3-27
- Nanami A, Sato T, Takebe T, Teruya K, Soyono K (2013) Microhabitat association in white-streaked grouper *Epinephelus ongus*: importance of *Acropora* spp. Marine Biology, 160, 1511-1517
- 日本サンゴ礁学会 (編) (2011) サンゴ礁学. 東海大学出版会, 東京. 362p
- 日本造礁サンゴ分類研究会 (2023) 日本造礁サンゴ分類研究会
<https://coralmonogr.jpn.org/>
- 西平守孝・Veron JEN (1995) 日本の造礁サンゴ類. 海游舎, 東京. 439p
- 沖縄県 (2023) 沖縄県赤土等流出防止対策基本画.
https://www.pref.okinawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/004/801/akatuchikihonkeikaku2-2.pdf
- 沖縄県 (2017a) 観光要覧.
<http://www.pref.okinawa.jp/site/bunka-sports/kankoseisaku/kikaku/report/youran/h28kankoyouran.html>
- 沖縄県 (2017b) SPSS の測定手順.
http://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/hozen/mizu_tsuchi/documents/spss-sokutei.pdf
- 大森 信・岩尾研二 (2014) 有性生殖を利用したサンゴ種苗生産と植え付けによるサンゴ礁修復のための技術手法. 熱帯海洋生態研究振興財団, 63p,
<http://www.amsl.or.jp/etc/japanese.pdf>
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key RM, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar RG, Plattner G, Rodgers KB, Sabine CL, Sarmiento JL, Schlitzer R, Slater RD, Totterdell IJ, Weirig M, Yamanaka Y, Yool A (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437, 681-686
- Romano SL and Palumbi R Stephen (1996) Evolution of scleractinian corals inferred from molecular systematics. Science, 271(5249), 640-642
- Romano SL and Cairns SD (2000) Molecular phylogenetic hypotheses for the

- evolution of scleractinian corals. *Bulletin of Marine Science*, 67(3), 1043-1068
- 佐野光彦 (1995) サンゴ礁魚類の多種共存にかかわる造礁サンゴの役割 サンゴ礁. 平凡社, 東京. 31p
- Spalding MD, Ravilious S, Green EP (2001) *World Atlas of Coral Reefs*, University of California Press, Berkley, 424p
- Stolarski J, Kitahara MV, Miller DJ, Cairns SD, Mazur M, Meibom A (2011) The ancient evolutionary origins of Scleractinia revealed by azooxanthellate corals. *BMC Evolutionary Biology*, 11(316)
- 水産庁 (2015a) サンゴ礁保全活動の手引き.
http://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_hourei/pdf/sango_hozenkatudou_0.pdf
- 水産庁 (2015b) 漁港・漁場の施設の設計参考図書 2015年版. 全国漁港漁場協会, 東京. 863p
- 水産庁 (2020) 平成31年度厳しい環境条件下におけるサンゴ礁の面的保全・回復技術開発実証委託事業報告書
- 水産庁 (2022) 令和3年度厳しい環境条件下におけるサンゴ礁の面的保全・回復技術開発実証委託事業報告書
- 鈴木 豪・新垣誠司・下田 徹・名波 敦・山下 洋・甲斐清香・林原 毅・與世田兼三 (2011) 石西礁湖における枝状ミドリイシ群集の回復阻害要因の検討. *日本サンゴ礁学会誌* 13:29-41
- 諸喜田茂充 (編著) (1988) サンゴ礁海域の増養殖. 緑書房, 東京. 341p
- 谷口洋基 (2005) トゲスギミドリイシを使ったシロレイシガイダマシの誘引実験. *みどりいし* (16), 20-22
- 土屋 誠・藤田陽子 (2009) サンゴ礁のちむやみ. 東京大学出版会, 東京. 203p
- 海の自然再生ワーキンググループ(2003) 海の自然再生ハンドブック (4) サンゴ礁編. 国土交通省港湾局, ぎょうせい, 東京. 103p
- Yamamoto H, Sugiura N, Maekawa T (2002) Coral growth processes using multiple regression analysis and neural network model. *Eco-Engineering* 14(3), 3-11
- Yamano H, Sugihara K, Nomura K (2011) Rapid poleward range expansion of tropical reef corals in response to rising sea surface temperatures. *Geophysical Research Letters*, 38. L04601
- 山里 清 (1991) サンゴの生物学. 東京大学出版会, 東京. 150p
- Ying H, Cooke I, Sprungala S, Wang W, Hayward DC, Tang Y, Huttley G, Ball EE, Foret S, Miller DJ. (2018) *Genome Biology*, 19(175)
- 横地洋之 (2004) サンゴ食害生物. *日本のサンゴ礁*, 環境省, 51-57