

# 特集

# 黒潮の恵み、サンゴの島の時空間

●文：中野義勝(琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設 技術専門職員)

2018年はICRI(国際サンゴ礁イニシアチブ)が定めた「国際サンゴ礁年」。1997年と2008年に次ぐ3回目だが、残念なことに世界のサンゴ礁の状況は回を追うごとに悪化している。サンゴの白化や死滅が招くのは、生物多様性の損失にとどまらない。サンゴが創出した地形や文化とともにある人間社会をも根底から揺るがす。今号は、サンゴという動物とサンゴ礁での人々の暮らしを見つめてきた中野義勝さんに、広い視座に立つサンゴ礁レポートをご寄稿いただいた。

## 多様性の宝庫

熱帯域に発達したサンゴ礁の清澄な浅海は光に溢れ、色と陰影に満ちている。南北の回帰線に挟まれる熱帯は、気候として見ると年平均気温20℃以上と温暖で日較差・年較差が小さいだけで「暑い」わけではない。サンゴ礁生態系は熱帯降雨林の生態系と並んで種の多様性が高いことは周知の通りであるが、これは熱帯域の気候が地球の歴史において長く安定な高エネルギー状態に保たれたことにより形成されたと考えられている。生命活動の維持が容易な湿潤で温暖な環境で生物はさまざまな適応戦略を進化させ多くの種が生まれ、熱帯雨林では植物が、サンゴ礁ではサンゴが複雑な3次元構造を生み出す骨格となり、構造の隅々まで多様な生物同士の営みが絡み合っている。地球全体でサンゴ礁の面積は約60万km<sup>2</sup>と全表面積の0.1%にすぎないが、世界の生物種170万種のうち15%(9万種)が出現すると言われ、種の多様性と複雑な種間関係こそが保護されるべき現象に他ならない。保護のためには対象を理解しなければならないが、上述のように長い歴史を経て形成されたサンゴ礁

生態系の理解には多方面の知見を動員しなければならないし、多様な知見を統合し俯瞰する能力も要求される。本稿では、このようなサンゴ礁保全のための多面的なアプローチを可能にする視点を共有したい。

## サンゴという生き物

サンゴは獲物を捕らえ、身を守るための刺胞と呼ばれる小器官を触手に持つことで、クラゲやイソギンチャクと同じ刺胞動物に含まれる。「サンゴ」と言う一般表現でサンゴ礁保全を語る時には、「造礁サンゴ」を指す場合がほとんどで「宝石サンゴ(珊瑚)」は含まれない。造礁サンゴとは幾つかの分類群にまたがり、文字通り「礁」を形成する能力を備えた、炭酸カルシウムの外骨格を作り体内に褐虫藻を共生させた種の総称である。分類学的にはイシサンゴ類が500種以上あるとされる造礁サンゴのほとんどを占めるので、特に断らない限り「サンゴ」はイシサンゴ類を指

していると考えて良いし、本稿でもそのように取り扱う。

刺胞動物の体の造りはシンプルで、巾着(袋)状の体壁に開く口とその内部の腔腸からなり、口を取り囲むように刺胞の充満した器官である触手が環状に配置されている。腔腸では消化器官と生殖器官が発達する。口を上に向けて基質に固着した状態をポリプと呼び、口を下に向けて浮遊する状態をクラゲと呼びならわしている。多くのサンゴはポリプが無性的に分裂増殖して多数連結した群体という生活型を持っている。ポリプは自らを保持し守る固い炭酸カルシウムの莢(きょう)と呼ぶ「さや」を作る。群体では莢が連結して骨

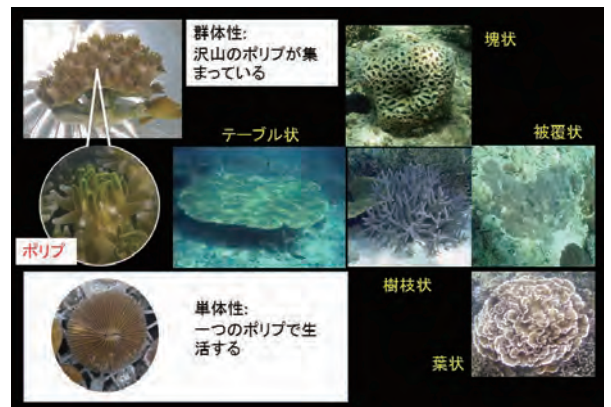


図1 サンゴは単体性と群体性に分けられる。後者は成長につれて、さまざまな形状を示す

格となり、私たちの目にする枝状や塊状といったさまざまな型を作り上げている(図1)。サンゴは底生性で多くは固着性であるが、卵からプラナラ幼生の僅かな浮遊期間に自由生活を送ることで分散している。

サンゴは表面積1cm<sup>2</sup>あたり数百万個も共生する直径1/100mmの単細胞藻類である褐虫藻の光合成産物(糖類)を得ることで、より多くの活動エネルギーを獲得できる(図2)。得られたエネルギーの一部は炭酸カルシウムの生成にまわされ、群体骨格の形成が促進されている。褐虫藻はサンゴの体内で生活することで刺胞に守られ、サンゴの代謝から増殖に必要な窒素やリンを得ることが可能である。



図2 サンゴのポリプを拡大すると、無数の褐虫藻が共生していることが分かる

### サンゴ礁の発達

海洋では、海水中に豊富に溶けているカルシウムと大気中から溶け込んだ二酸化炭素をもとに容易に炭酸カルシウムが生成できるので、多くの海洋生物がこの過程を利用して石灰質の骨格や殻を作っている。また、ホズナやシヤコガイなどのように共生する藻類が石灰化の一助となっている例もしばしば見られる。地史的には、古生代の有孔虫の仲間のフズリナの堆積による石灰岩層の形成や、海綿類などの殻が堆積した岩礁が出現し生態系の基盤となることがあり、現生では牡蠣礁やサンゴ礁がこれに相当する。

群体の成長過程でポリプは効率的に光合成を行えるように3次的に配置されるが、波浪や堆積物の影響や他種のサンゴとの競争などの種間関係の結果としてさまざまな群体型が出現した。生きたポリプは群体の表面にのみ存在するので、群体内部は無機質な石灰質の構造となる。こうしてサンゴが代々成長と死を繰り返して骨格を堆積させ、石灰岩

の地質としてサンゴ礁が形成される(図3)。サンゴは光合成のために浅い海底に生活するが、自らを土台として浅瀬を形成し、海面まで達したサンゴ礁は沖に向かって広がってゆく(図4)。このようなサンゴ礁を「裾礁」と呼び、礁の発達する沖側の斜面を「礁斜面」、陸側の平坦地を「礁原」と区別する。礁斜面の浅い部分は「礁縁」と呼び、強い波浪の影響にも耐える堅牢な群体のサンゴが分布している。礁原には礁の発達から取り残された浅瀬である「礁池」がみられ、礁池と礁斜面の深い部分では波浪の影響が弱く、いろいろな群体型のサンゴが生息可能で、サンゴの種の多様性が高い。ただし、礁池は浅く陸域や気象の影響による変動の大きな水質環境への適応が求められ、礁斜面は外洋に面して安定した水質であるが水深と共に減少する光量と変化する波長への適応が求められるので、サンゴの群集構造はそれぞれ異なったものとなる。このようなサンゴ礁の発達過程は地質活動とも密接に関係しており、「ダーウィンの沈降説」では火山島のような陸塊が海面に現れると礁の発達基盤となるが、火山活動の休止により島が沈降し始めると、礁は海岸か

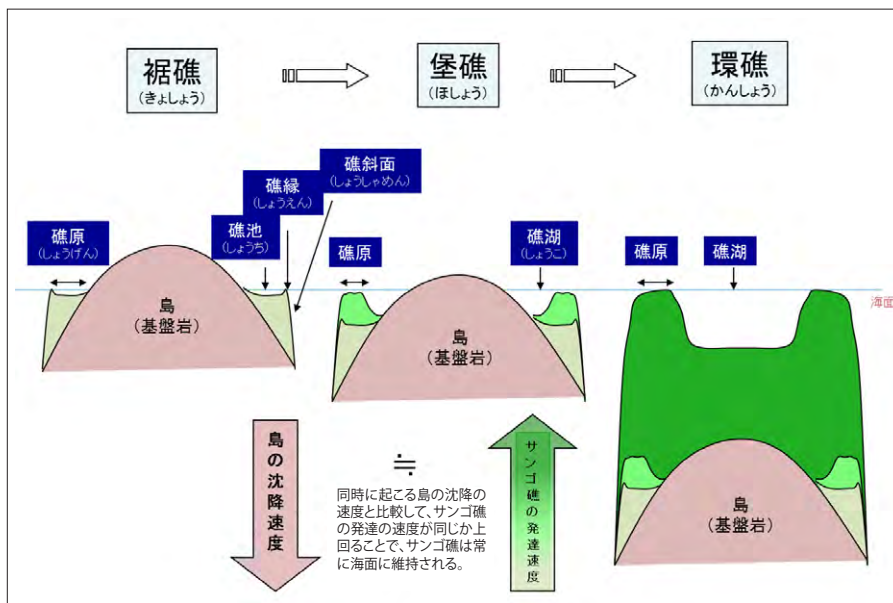


図3 サンゴが生み出すさまざまな地形



図4 沖縄県石垣島白保集落付近の裾礁(奥に石垣新空港)

らはるか沖に向かって発達し「堡礁」と呼ばれるようになり、礁池は深い「礁湖」となる。さらに島の沈降が進み海面下に没すると、礁は環状に海面に残り「環礁」と呼ばれる。逆に隆起に伴い礁が離水し陸地となる場合もあり、沖縄の島々で見られる段丘を伴う平地は隆起した裾礁であるし、南北大東島は離水した環礁である。喜界島などは現在も隆起が著しく礁の形成が貧弱である。沖縄の島々を高島・低島と分けることがあるが、高島とは沈降によって陸地の山頂部が海面に残った島でイリオモテヤマネコに代表されるように遺存種が多い。低島は島全体または大部分が隆起したサンゴ礁で、宮古島などではハブのいない理由の一つに挙げられる。

### サンゴ礁に生きる

サンゴ礁の形成される熱帯の浅海域は貧栄養状態で植物プランクトンの大繁殖が無いので、豊富な日射が海底に到達するために褐虫藻の光合成が促

進されている。海洋生態系の一次生産者として植物プランクトンは重要な位置を占めるが、サンゴ礁域ではサンゴがその位置を担っている。また、構造的にも森林に似通ったサンゴ礁でサンゴは森林における樹木と同様に、他の生物の住みか・隠れ家・産卵場所といった空間を提供することで高い種の多様性を維持するため、生態学的な機能でも似通っている。サンゴに依存し集まる生物を狙って集まる多くの生物達も含めてネットワークが構成され、サンゴ礁の発達につれて現れるさまざまな微地形を生息環境とすることでネットワークはより大きく複雑になってゆく(図5)。貧栄養で生き物の少ない熱帯海域でサンゴ礁は、砂漠のオアシスにも例えられる。

世界の海洋でも有数の流量と流速を誇る黒潮は台湾東岸から琉球列島の東シナ海側を北上し、奄美大島を過ぎて太平洋に抜けて房総沖に至る暖流である。熱帯域に端を発することでプランクトンが少なく透視度が高くより深く

支流の対馬海流と併せた流域の日本各地に温暖で湿潤な気候をもたらす。サンゴの幼生も黒潮に運ばれ北上し東京湾でも生育しており、サンゴ礁の形成は種子島付近までみられる。現在の日本では琉球列島と小笠原諸島にサンゴ礁が形成されているが、国内最古の旧石器人骨が発掘された石垣島竿根田原(さおねたばる)洞穴遺跡上層からは貝類遺物も見つかり、サンゴ礁の形成につれて人々が海へ依存していたことがわかる。その後、琉球列島の島々では、隆起した礁原の平坦地で集落と農地を営み、前面の礁池から魚介類を獲る半農半漁の生活を通して、豊かな信仰や祭祀を伴ってサンゴ礁文化圏を形成し、近世にいたって琉球文化と呼ばれるまでに発展している。長い歴史の中で黒潮は人々の交流も促し、考古学では「貝の道」として、民俗学では柳田国男による「海上の道」として、黒潮文化圏とも呼ぶべき伝播の有様が考証されている(図6)。

### 地域的危機と地球的危機

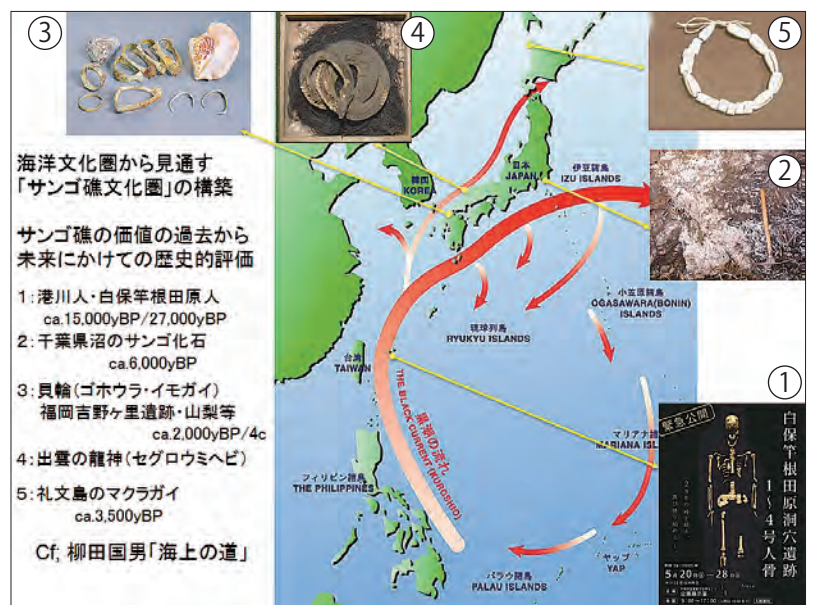
しかしながら、サンゴ礁の多様な地

暗い海中まで見通せ、黒々と見えるので黒潮と呼ばれ、

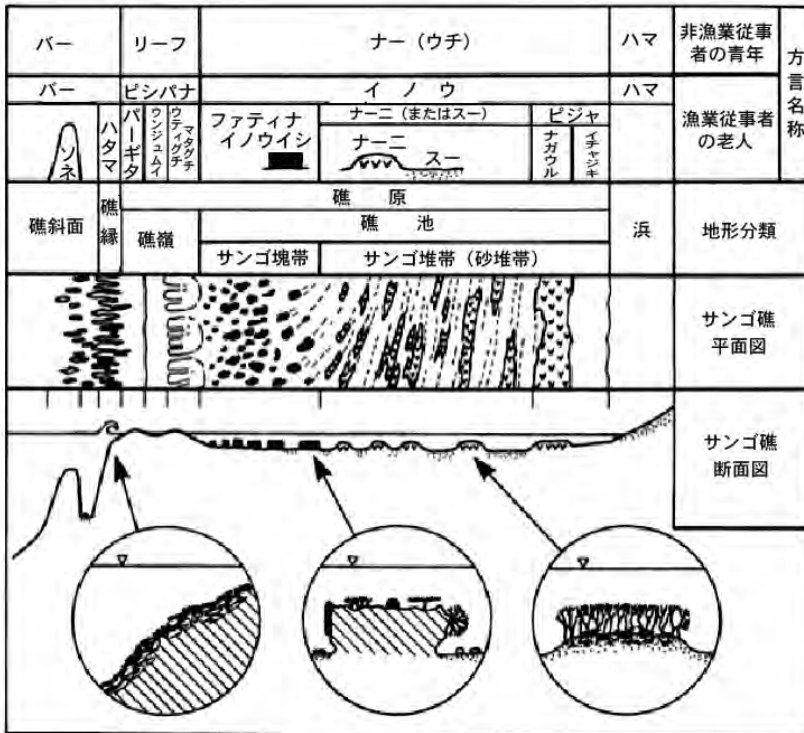


【図5】一本のサンゴ枝のまわりの動物の世界(ゲールラハによる)

サンゴ礁は生き物が織り成すネットワークの基盤であり「生態系の骨格」と言える



【図6】黒潮が生んだ「サンゴ礁文化圏」



■図7 与論島北東部サンゴ礁の帯状構造と民族分類(中井, 1981MS および堀, 1980 より作成)  
言語表現には「海と人」の関係性が表れる。生活の多様性が失われると同時に言語も消えていく

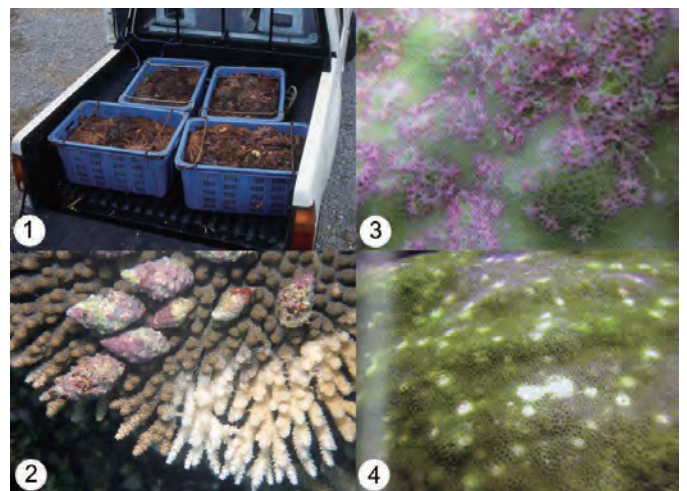
形を表す生活言語の消失(図7)に見られるように、サンゴ礁を利用する伝統智はその文化と共に急速に失われつつある。人とサンゴ礁の関わりが薄れることは、サンゴ礁が伝統的価値を失うことであり、その一部は埋め立てられて経済発展に伴って拡大する都市機能の一部とされてきた。失われたサンゴ礁は取り返しが見つからないが、観光開発や道路整備による海岸地形の改変は、サンゴ礁の発達過程を見ても明らかのように陸域と一体を成すサンゴ礁生態系を寸断し、断片化したネットワークは環境包容力が低下し本来の多様性を維持できなくなる。また、観光による踏み付けなどの微地形の破壊はハビタットを奪い、水産資源の乱獲は資源量の減少ばかりでなく種間関係をも歪め、生態系機能の断片化を引き起こす。

ローカルな問題として、長年に亘り沖縄の保全の現場を煩わせてきたの

が「赤土」の流出である。清澄な海水を好むサンゴにとって流出土砂の堆積や濁りは大きな攪乱だが、赤土の大部分が農地から排出されることから富栄養化や農薬の流入と言った攪乱が同時に起こっている。沖縄の耕地面積の多くを占めるサトウキビ栽培の営農法が解決のカギであることは指摘されているが、解決には至っていない。沖縄の島嶼の平地はサンゴ礁の隆起により離水した礁原である場合が多く、これを圃場として利用した場合、多孔質の石灰岩を浸透する雨水に含まれる肥料や農薬は地下水を汚染する。水資源の少ない島嶼では、地下ダムとして利用される地下水の汚染

は深刻で畜産排水と共に問題になっている。住宅地からの生活排水も離島部の下水道への接続率の低さなど課題が多いが、沖縄本島の一部などで再生水プラントの試験導入が試みられており、水源の開発負荷と過剰な施肥の両面の軽減に期待が持たれている。サンゴ礁海域の富栄養化は、サンゴの最大の食害生物であるオニヒトデの大発生の要因とも目されており、サンゴの病気の要因にも数えられ、その軽減は大きな課題である(図8)。

グローバルな問題は気候変動に伴う海水温の上昇と、変動を引き起こす二酸化炭素の海洋への溶け込みによる海洋酸性化である。温度とpHという生命活動にとって重要な因子の異常は、海洋生物全般に及ぶものであるが、現在の水温変動の勢いはサンゴの褐虫藻との共生機構に壊滅的な被害を及ぼしつつある。1998年に世界を席卷した海水温上昇によるサンゴの白化被害は、その後も頻発している。国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC)がこのほど公表した特別報告書の素案では、現在のままでは2040年に地球の気温上昇が1.5℃に達し、今まで以上に対策にコストをかけなければさらに大きな



■図8 食害生物と病気  
水温の上下動による白化に加え、オニヒトデ(1)や巻貝(2)による食害や病気(3)など、さまざまストレスによってサンゴの死滅が進む



図9 波に打たれても育ち、地質・地形をつくることができるサンゴの真似は人工物にはできない



図10 人工的な支柱によって樹木のように海底に立ち並び養殖サンゴ(恩納村) その維持に必要なのは計画→モニタリング→対策のサイクルを回す順応的な管理手法である

リスクを負うことになるとしている。これは、サンゴの白化被害が今後も免れ得ない自然災害となったことをも意味している。

### サンゴ礁の危機管理

森(2010)<sup>※1</sup>によれば、安定な生態系は動的平衡状態にあるとされ、耐性や回復力と言った自己回復機能(レジリアンス)を持っている。と同時に、生態系の構成・構造・機能は大きく変動し、画一的な定常状態や平衡点に達することがない自然変動性を有しており、長期の観察による重要な進化的環境因子の把握が肝要となる。しかしながら、変動性によらずともレジリアンスの臨界点あるいは閾値を超えると、異なる状態に移行してしまうレジームシフト<sup>※2</sup>を引き起こす。レジームシフトを引き起こすリスクや、生態系サービスの劣化に至るリスクを管理する「リスクマネジメント」には前述の2点の視点を踏まえ、未確定な結果においても自然システムと社会システムの相互依存を念頭に持続可能性を模索する順応的管理が重要になる。脆弱であるとされるサンゴ礁生態系は多様で複雑である

のでネットワーク全体で攪乱を緩衝することで、近年の地域的な環境攪乱に対して思いのほか高いレジリアンスを示してきた。しかしながら、わずか数千年でサンゴ礁地形は変遷することから自然変動性も大きく、地域的にみただけでは地球規模で進行する気候変動などには対応できない可能性が大きい。ただし、観察する時空間の定義を変えることによって、攪乱の結果についての評価は異なる可能性があり、注意深く、それを吟味する必要がある。

### サンゴ礁と共に生きる

好調が続ける沖縄観光を担保するのは、世界自然遺産登録を目指す温暖な気候に育まれた自然と文化であり、サンゴ礁は島に暮らす人々にとって将来にわたってかけがえのないものである(図9)。観光産業を中心とした持続的発展のためには、ハワイ州の観光のあり方を検討することで新たなビジネスモデルの構築が期待できるが、このためには、自然資源保全をブランド化することが不可欠である。進行する気候変動下では、サンゴの種や生息地に

よって攪乱要因への感受性が異なることを念頭に、群集の遷移を捉えるきめ細かなモニタリングを行い、被害の質と程度に応じて保護区の設定やサンゴの養殖などを組み合わせた保全利用計画を立案実行し、その結果を常にフィードバックさせる順応的対応が求められている(図10)。このために多様性をそれぞれの部分として理解することは重要だが、「全体は部分の総和に勝る」ことを忘れずに、複雑に絡み合うネットワーク全体を意識し適応的に保全することが肝要である。このような視点でサンゴ礁保全に取り組むことは、地球環境保全への取り組みをも身近にしてくれるのではないだろうか。



中野 義勝 なかの・よしかつ

琉球大学大学院理工学研究科生物学専攻修士の理学修士。同大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設に所属。実は神奈川県横浜市育ちのハマッコで、1980年に大学進学を機に沖縄に移住した。科学と社会学の融合を得意とし、2011年から17年まで大学や研究施設所属の学者と市民科学者が共に学ぶ日本サンゴ礁学会でサンゴ礁保全委員会の委員長を務めた。2010年から沖縄県サンゴ礁保全推進協会会長。

※1 森章(2010)生態系のリスクマネジメントにおける留意点-変動性と疲弊構成の観点から-。日本生態学会誌60:337-348

※2 レジームシフト(regime shift)：大気・海洋・海洋生態系からなる地球の動態の基本構造が数十年間隔で転換すること(広辞苑より)