

1-2 サンゴ礁の分布

茅根 創・本郷宙軌・山野博哉

1 はじめに

地形としてのサンゴ礁の定義は、「サンゴなどの（造礁）生物が集積して礁石灰岩を作り、海面近くまで達して防波構造物を作る地形」である（八杉ら 1996）。この定義によるサンゴ礁は、日本では北緯24度から31度までの琉球列島と、北緯27度以南の小笠原諸島の島々に分布する。いずれも島に礁原が接した裾礁である。日本のサンゴ礁は、世界的にみれば分布北限域に位置し、サンゴ礁地形が分布する地域と、サンゴ群集だけが分布して地形としてのサンゴ礁を作らない地域とが、緯度に沿った水温勾配に沿って連続的に分布する。琉球列島にはサンゴ礁が分布するが、これより北の九州・四国・本州ではサンゴ礁は見られず、岩盤上をサンゴ群集が覆うだけである。最近、北緯33度45分の壱岐諸島でサンゴ礁が発見された（Yamano *et al.* 2001c）が、従来北限とされた種子島・屋久島と壱岐諸島の間にはサンゴ礁は見出されていない。

琉球列島南部の北緯27度以南では、幅1 km程度のサンゴ礁が作る平坦面である礁原が連続的に海岸線を縁取るが、北緯27度以北と小笠原諸島ではサンゴ礁の分布は断続的になり礁原の幅も狭くなる。琉球列島は黒潮流域にあたり、モンスーン地域であり、台風の常襲地域である。こうした気象・海象条件も、サンゴ礁の形成と分布に大きな影響を与えている。

本節では、最初に日本のサンゴ礁地形の形成を規定する地質・テクトニクスと気象・海象について概観し、次にサンゴ礁地形の分帯構成とその形成過程、地形の地理的变化についてまとめる。最後に、こうした地形の特性がサンゴ礁の保全・管理に対してどのような意味をもっているのかについて議論したい。

2 サンゴ礁地形形成の地理的背景

1. 地質・テクトニクス

日本列島は、太平洋プレート北西縁の沈み込み帯に位置する島弧である。日本列島の南半（本州南部、四国、九州、琉球列島）では、伊豆～小笠原弧の背弧海盆であるフィリピン海プレートが沈み込む（図1）。日本列島の南西端、北緯31度～24度までに分布する島々は、南西諸島と呼ばれる。南西諸島は北部の薩南諸島と南部の琉球諸島に分けることもあるが、一般に全体を琉球列島と呼ぶことが多く、本書でもそれに従った。

琉球列島はフィリピン海プレートの境界に沿って連なり、琉球海溝～琉球列島～沖縄トラフが平行に配列する。小笠原諸島は太平洋プレートの境界に沿って連なり、伊豆・小笠原海溝～伊豆・小笠原諸島～小笠原トラフが平行に配列する。両諸島の他、フィリピン海プレート内の海嶺上に、隆起環礁である南・北大東島、隆起卓礁であ

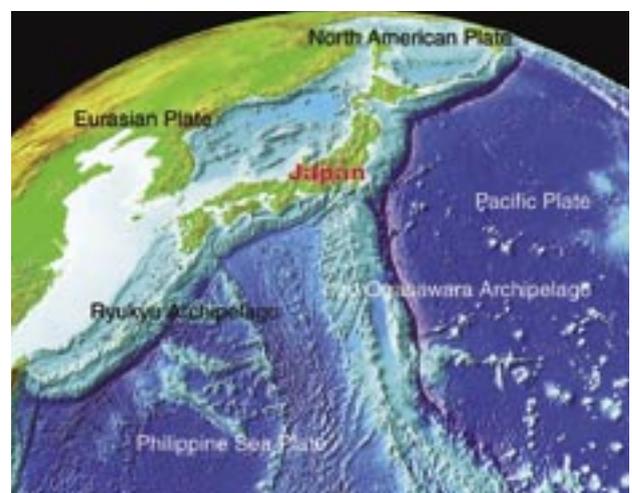


図1 日本と周辺海域（海上保安庁海洋情報部提供）

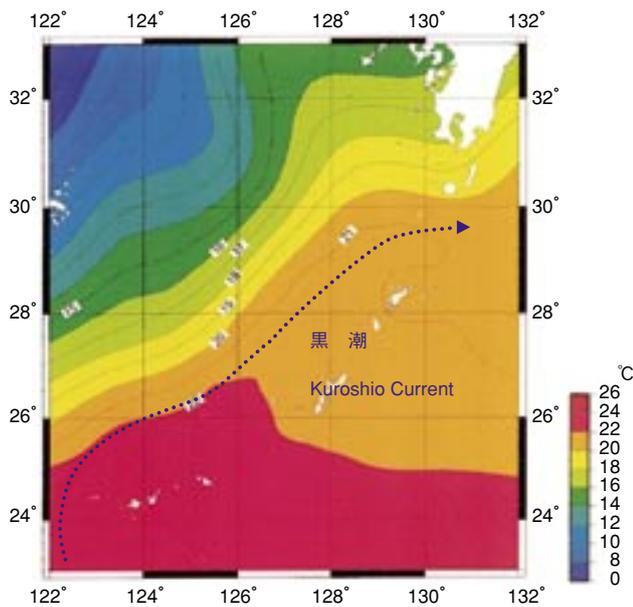


図2 琉球列島海域の2月の水温分布と黒潮の流路。気象庁刊行CD-ROM（海況統計資料1971-2000）から作成

る沖大東島、卓礁である沖ノ島、太平洋プレート上の卓礁である南鳥島にサンゴ礁が分布する。

琉球列島はもともとアジア大陸と地続きで大陸棚の縁辺を作り、そこには鮮新世の島尻層群と呼ばれる泥岩が堆積した。沖縄トラフの形成はおおよそ1,000万年前から始まったが、200万年前以降の更新世になると著しく沈降した（Kimura 1985）。その結果琉球列島が大陸と切り離されて島弧になり、大陸からの土砂がトラフにトラップされ、サンゴ礁形成の場が作られた。琉球列島はサンゴ礁とその周辺の石灰質堆積物の堆積の場となり、ここには琉球層群と呼ばれる石灰質の地層が堆積した（Nakamori *et al.* 1995；Iryu *et al.* 1998）。

第四紀後期には、多くの島が隆起しサンゴ礁段丘が形成された。12万年前の最終間氷期に形成されたサンゴ礁は、隆起して段丘地形を作り、その高度は、喜界島では220m、波照間島では35m、与那国島では24mの高度に達する（Ota and Omura 1992）。最近も多くの島が地殻変動によって隆起しており、喜界島などでは完新世に形成された離水サンゴ礁が見られる（Koba *et al.* 1982）。

琉球列島の島々は、こうした地史に応じて、サンゴ礁段丘が全島を覆う標高10~200mの低島、島尻層群以前の地層が露出する標高100~700mの高島、標高100~

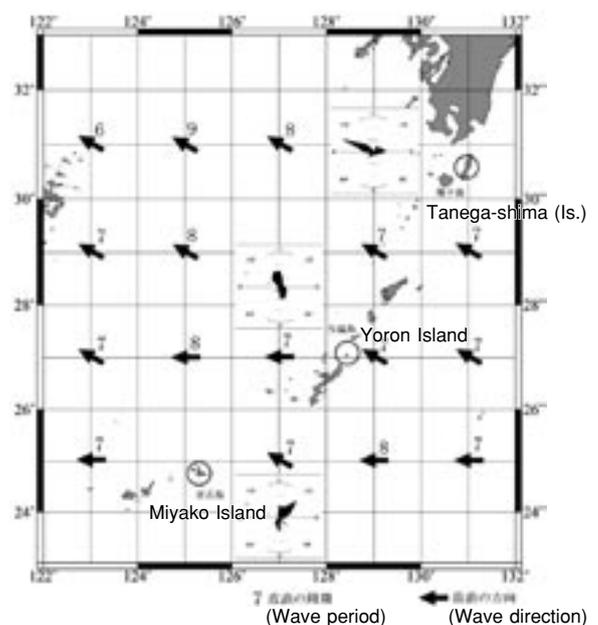


図3 風配図と波浪の方向。波浪図は、気象庁ホームページ（<http://www.data.kishou.go.jp/marine/wave/chart/mean/jpmean.html>）2002年沿岸平均波浪図。風配図は、気象庁電子閲覧室（<http://www.data.kishou.go.jp/>）2002年の毎日の最大風速時風向から作成

1,000mの火山島の3タイプに分けられる（目崎 1985）。島のタイプに応じて、降水の流出特性や土壌、土地利用などに差異が認められる。

2. 気候・海象

緯度に沿って北ほど表面海水温が低くなる。最寒月の水温は、琉球列島南端の八重山群島では24℃であるのに対して、北端の薩南諸島では19℃である（図2）。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。このため、同じ緯度の海域より水温が高く、南からサンゴ幼生が供給されるので、琉球列島のサンゴ礁は北限にしてはサンゴの種多様性が高く、サンゴ礁地形の連続性が高く規模も大きい。

モンスーン地域にあり、夏季には太平洋からの南風、冬季には大陸からの北風が卓越するが、冬季の北風の方が風速は大きい（図3）。琉球列島全体としては東側に広い太平洋が存在するために、東側からのうねりが強い（図3）。

台風の常襲地域であり、琉球列島南部の沖縄県には、年間平均して7個の台風が接近する（Yamano *et al.* 2000）。その内の多くは勢力が強く、30m/秒以上、時には60m/秒以上の風速を持つ猛烈なものである。

3 日本のサンゴ礁地形の特性

1. 特徴

琉球列島のサンゴ礁地形は、海面付近に広がる平坦面（礁原：reef flat）とその海側の斜面（礁斜面：reef slope）との二つに大別される（図4）。二つの地形の境界が碎波帯になっている場合が多く、陸側礁原上の穏やかな環境と海側の外洋的な環境とに分けられる（写真1）。

礁原は全体として平坦であるが、海側に低潮位から場合によっては潮間帯まで達する高まりを持つことが多い。その陸側には水深1～3m程度の凹地が見られる。礁斜面は、礁原の縁の碎波帯から水深20m前後まで、緩やかに傾斜する起伏の大きな地形が続く。ここは、海岸線と直交方向にのびるリッジ列で特徴付けられる（写真2）。リッジを縁脚、リッジとリッジの間の凹地を縁溝と呼ぶ。この緩斜面は水深20mで終わり、水深50mまで急斜面になり、再び傾斜が緩やかな島棚に至る（図5、写真3）。急斜面には塔状の高まりであるピナクルが発達するのに対して、島棚は平滑である。礁原からいきなり島棚まで落ち込むようなサンゴ礁の模式図は、琉球列島のサンゴ礁には合致しない。

このように明瞭な地形分帯構成を持つにも関わらず、その用語については研究者ごとに異なっており、同じ地形が異なる用語で呼ばれている場合もある。こうした混乱は、サンゴ礁の統一的な保全・管理を進める上で問題である。ここでは、礁原—礁斜面という最も基本的な地形単元を認めた上で、礁斜面については陸側の起伏の大きな地形を縁脚—縁溝系、その海側の急斜面を外側斜面と呼ぶことを、礁原については海側の高まりを礁嶺、陸側の浅い凹地を礁池（back-reef moat）と呼ぶことを提案したい（図4）。

礁池は浅礁湖と呼ばれる場合もあるが、礁原は全体としてみれば水深の変化が1～3m以下の平坦面であり、より低緯度に分布する堡礁や環礁に見られる水深10m以上の礁湖とは、その規模も成因も異なっている。実際、堡礁や環礁の礁原上にも陸側にやや浅くなった平坦面が見られる場合があり、浅礁湖という呼び方はグローバルにサンゴ礁を比較する際に混乱を招く。

礁嶺を、サンゴが分布しない礁岩が露出する高まりの

名称として用い、その両側のサンゴが分布する高まりを内側・外側礁原と呼ぶ場合がある。一方、海岸線沿いの平坦面を内側礁原と呼ぶ場合もある。また、礁嶺陸側のサンゴ礫や枝サンゴが分布する高まりを礁舗と呼ぶ場合もある。さらに、沖側に高まりをもたない場合もある。こうした礁原地形のバリエーションは、地形の発達程度や地殻変動の差異によって作られたもので、必ずしも琉球列島のどのサンゴ礁にも共通する特徴ではない。また地形の特徴だけでは分帯の判別が困難であり、一般化することはできない。「海面近くの平坦面（礁原）」とその中の「海側の高まり（礁嶺）」という地形単元が、（それが認められない場合も含めて）最もわかりやすい地形区分である。礁原という基本単元を認めた上で、礁嶺～礁池という区分を二次的な区分とし、これ以上の細分は島の個性や研究目的に合わせて定義することが望ましい。

2. 形成過程

琉球列島のサンゴ礁は、1980年代以降多数の浅層掘削調査が行われ、その上部構造と形成過程が明らかにされてきた（e.g. 小西ら 1983；Takahashi *et al.* 1988；Yonekura *et al.* 1994；Yamano *et al.* 2001a）。1990年代後半以降はこれに加えて、港の建設に伴ってサンゴ礁を切って作られた海底露頭の潜水調査によって、より詳細な情報が得られている（Kan *et al.* 1995, 1997；Kan and Hori 1993；Yamano *et al.* 2001b）。こうした調査によって、琉球列島のサンゴ礁の形成過程とその地理的変化が明らかにされた。以下では、こうした結果に基づいて後氷期の海面変動とサンゴ礁形成過程についてまとめる。

世界のサンゴ礁と同様、日本のサンゴ礁も後氷期の海面上昇とその後の安定に伴って形成され、礁原～礁斜面という特徴的な分帯構成が作られた。2万年前の最終氷期最盛期に現海面下120m～140mまで低下した海面は、氷期終了とともに1m/100年前後という急激な速度で上昇した。1万2千年前には現海面下60～50mで海面上昇がいったん停止し、その後また急激に上昇、約6,000年前にはほぼ現海面に達して安定した（Fairbanks 1989）。

サンゴ礁は、後氷期の海面上昇期のある時期から上方に堆積して形成された。ちょうど、サンゴ礁の頂面が上昇する海面を追いかけるように形成されたと考えられる。熱帯域では、氷期に海面が低下していた現海面下120～140mのところから形成されたサンゴ礁が知られている

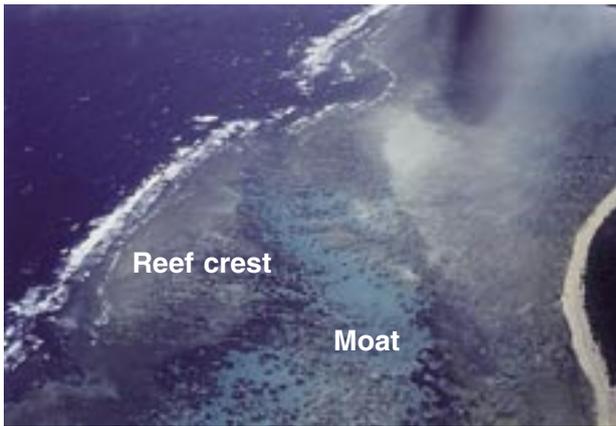


写真1 サンゴ礁分帯構成。石垣島白保における礁嶺 (Reef crest) と礁池 (Moat)



写真2 与論島北東サンゴ礁の縁脚 - 縁溝系。水深5m



写真3 与論島南岸サンゴ礁の礁斜面基部の内側傾斜変換点 (IB)。水深52m

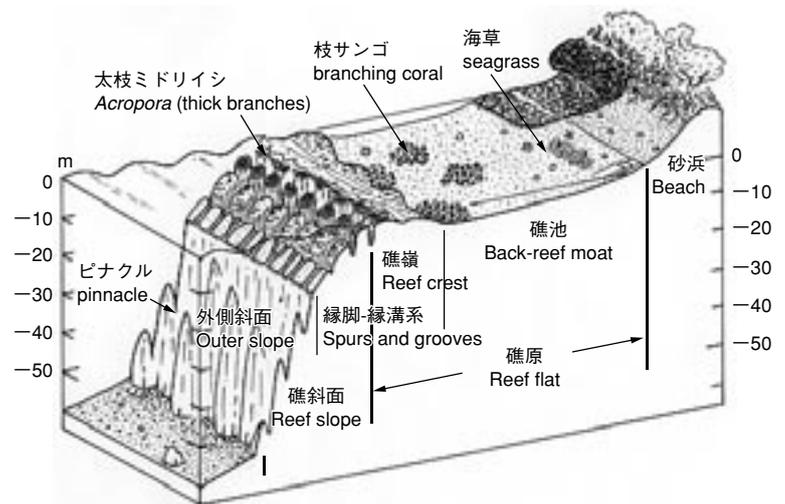


図4 サンゴ礁の模式図

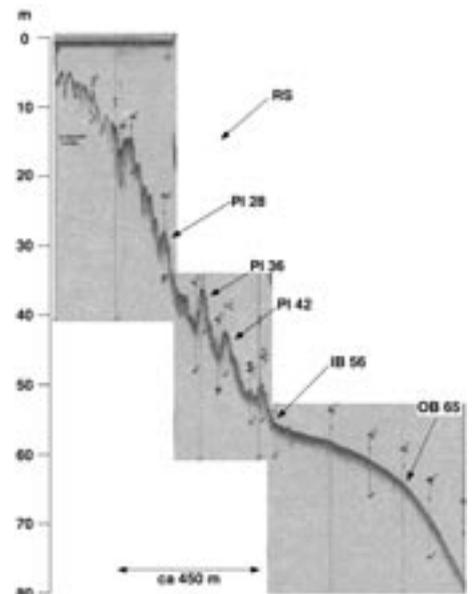


図5 サンゴ礁礁斜面地形の音響測深記録。石垣島北端平久保沖。堀・茅根 (2000) による。RS: Reef Slope (礁斜面)、PI: Pinnacle (ピナクル)、IB: Inner Break (内側傾斜変換点)、OB: Outer Break (外側傾斜変換点)。数字は水深 (m)。IBより陸側は、ピナクルなどサンゴ礁が作った地形が見られるが、IBより海側では平滑な島棚斜面が見られるだけで、顕著なサンゴ礁の形成は認められない。氷期には海面は現海面下120m前後まで低下し、その後急激に上昇した。およそ1万2千年~1万年前に海面上昇速度がいったん低下したときに、OBからIBの平滑面が形成された。その後1万年前~6千年前に海面はまた急激に上昇したが、琉球列島のサンゴ礁は、この海面上昇期に形成された。PIは急な海面上昇に追いつくことができなかったサンゴ礁である。音響測深記録のさらに陸側が礁嶺になる。

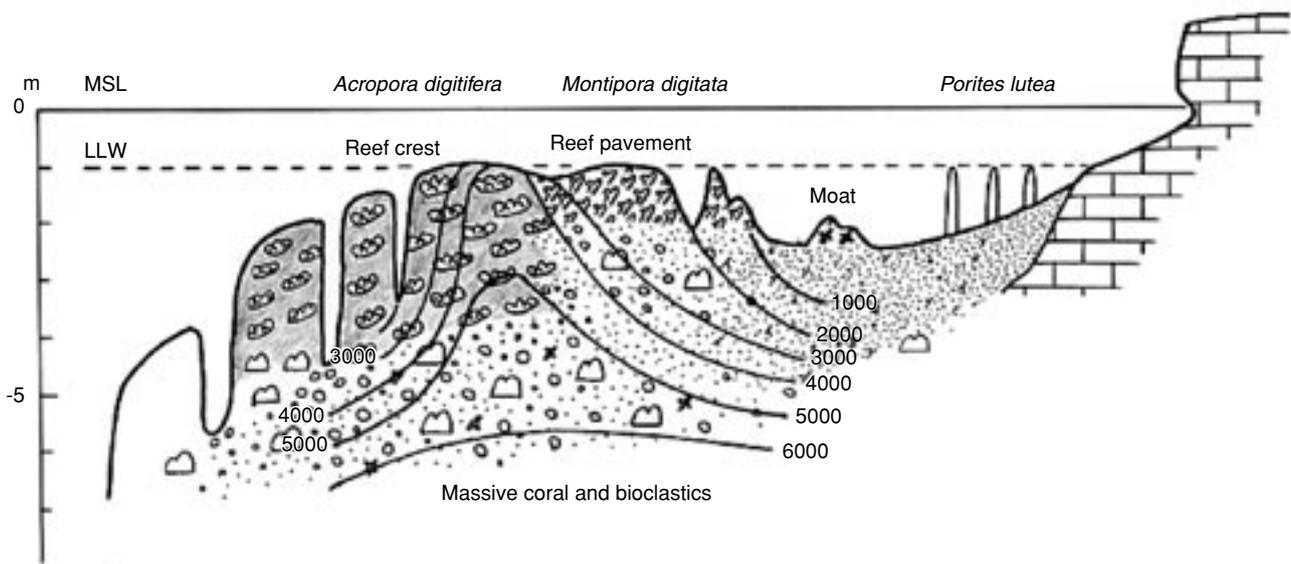


図6 琉球列島の裾礁の形成過程模式図。Yamano *et al.* (2001a) などをもとに作成。1000-6000：1,000-6,000年前の地形断面

(Fairbanks 1989；Chappell and Polach 1991)。しかし琉球列島では、現海面下50mより深いところには顕著なサンゴ礁地形は見られない(堀・茅根 2000)。これは、1万2千年以前にはこの海域がサンゴ礁形成域ではなく、1万年前以降にサンゴ礁の形成が始まったことを示している。1万年前以前は、冬季の水温がサンゴ礁形成の限界である18℃に達していなかったためであろう。一方、琉球列島南部の北緯24~27度では、サンゴ礁の形成が始まった地点が現海面下50mと緯度によらず一致していることから、この海域では1万年前以降同時にサンゴ礁形成域になったと考えるのが妥当である。

1万年前から6千年前までにサンゴ礁は急激な海面上昇を追いかけて上方に堆積した。上方堆積期のサンゴ礁は、塊状のサンゴ、枝サンゴと、その間を埋めるサンゴ礫などによって構成され、上方への堆積速度は1m/100年以上と早かった。堆積した水深は、当時の海面下5m以深だったと推測される。つまり海面上昇時には、現在みられるような礁原や礁嶺は見られなかった。海面が安定した後に、サンゴ礁の頂面が海面に達した。それが、海側の高まりである礁嶺である。礁嶺は、太い枝状のコユビミドリイシ(*Acropora digitifera*) オヤユビミドリイシ(*A. gemmifera*)によって堅固な枠組みが作られた。

礁嶺の上方堆積速度は、0.1~0.4m/100年程度と遅くなる。礁嶺の形成によって外洋とその陸側の環境が分けられて、地形分帯構成が完成した。

礁嶺が形成された後、その背後の凹地が砂礫によって埋積された。砂礫は、海側の礁嶺・礁縁で生育していたサンゴと有孔虫の遺骸で、これらが波によって陸側に運搬されて埋積が進む(図6；Yamano *et al.* 2001a)。礁嶺のすぐ陸側に礁縁からもたらされたサンゴ礫が堆積したり、枝状サンゴ群集が見られる場合があり、礁舗と呼ばれる(Yonekura *et al.* 1994)。さらに海側へは、礁嶺が成長した(Kan and Hori 1993)。

琉球列島は地殻変動が激しいため、分帯構成形成後サンゴ礁が隆起するが多い。隆起量が大きく、サンゴ礁全体が高潮位より上部に離水すると、現在のサンゴ礁はその縁脚上に小規模なものが作られ、礁原の幅はきわめて狭くなる。喜界島がその代表例である。一方隆起量が小さく、礁嶺が潮間帯内にとどまると、幅広い礁原と分帯構成は残されるが、礁嶺上にはサンゴが分布せず礁岩が露出するようになり、外洋との海水交換も著しく制限される。石垣島白保では、礁嶺の高度は平均海面付近まで達するが、これは1mほど地殻変動によって離水したためである。



写真4 八重山群島石西礁湖を縁取るサンゴ礁礁原（撮影：長谷川均）



写真5 奄美群島徳之島では、サンゴ礁の分布は断続的である

3. 地理的变化

このようにサンゴ礁地形は、基本的には後水期の海面変動とそれに対するサンゴ礁の上方への堆積によって概形が作られた。サンゴ礁の頂面が海面に追いついた後は、側方への堆積によって分帯構成が作られた。琉球列島のどのサンゴ礁でも、サンゴ礁形成の基本プロセスは一緒であり、礁原～礁斜面という地形構成も等しい。一方、水温や波など環境条件の地理的变化に応じて、サンゴ礁地形には、様々な地理的变化が認められる。一つは緯度に沿った変化、もう一つは同じ島で見られる変化である。

琉球列島南部の北緯24～27度では緯度によらず現海面下50mからサンゴ礁が形成され、幅1km前後の礁原が見られる（写真4）。礁原の幅は、サンゴ礁形成前の島棚の幅によって規定され、島棚の幅が広いほど礁原の幅も広がる。一方北緯27度以北では、サンゴ礁形成の開始した地点がより陸側になるために、礁原の幅も狭くなり、分布も断続的になる（写真5）。1万年前以降の温暖化と海面上昇に伴って、サンゴ礁形成域が徐々に北方に拡大していったためである。

1つの島でも、サンゴ礁地形には変化が見られる。一般に、北～東側海岸では連続した礁原がつながり、礁嶺もよく発達していることが多い。一方、西側海岸では礁嶺の発達が悪く礁原が断続的であることが多い。これは、琉球列島では南北からの夏季・冬季季節風と東からのうねりが卓越するため、島の東側で波が強く、これに対応して堅固な礁嶺が形成されたためである（図3）。

4 地形特性と保全

サンゴ礁の保全・管理を進める上で、日本のサンゴ礁地形の特性を十分考慮する必要がある。第一に、陸に接した裾礁であるため、陸側の影響を受けやすい。これには、陸をベースにした利用・保全・管理が容易であるというプラスの側面と、陸の開発の影響を直接受けやすいというマイナスの側面がある。サンゴ礁が海岸線に接しているため、サンゴ礁資源の利用が地先漁業として行われてきた。モニタリングも容易である。一方、陸側開発によって発生した赤土や栄養塩などは、サンゴ礁礁原に直接流入する。島々の開発が進んでいる近年は、裾礁であることのマイナス面が強くあらわれている。

琉球列島のサンゴ礁は、先に述べたように、礁嶺の頂面が地殻変動によって潮間帯内に持ち上げられている場合が多い。こうしたサンゴ礁では、外洋との海水交換が礁嶺によって制限され、礁原上は閉鎖的な環境になりやすい。さらに礁嶺形成後その背後の埋積が進んだサンゴ礁が多いため、礁原上の水深はせいぜい1～3mと浅い。低潮位時にはほとんど干出してしまう礁原もめずらしくない。陸からの影響が強いという特性とあわせて、礁原上の環境はサンゴの生育にとって厳しく、こうした環境に生育可能なサンゴ群集が分布している。

礁原と礁縁の環境は大きく異なっている。礁原上にサンゴが見られない場合も、礁縁には多数のサンゴが分布していることがある。その逆の場合もしばしばある。陸からの流出物は、礁原がある場合には礁縁には直接流入

せず、流入する場所が礁原の切れ目などに限定されている。環境条件やサンゴ群集の健全度のアセスメントの際には、礁原と礁縁とを分けて調査・評価する必要がある。

日本は、モンスーンによる季節風が強い上に台風の常襲地域にある。台風の際には群集の一部が更新することもしばしばある。そうした点で、日本のサンゴ群集は常に発達段階の若い段階にあるといえるかもしれない。サンゴ礁は、こうした高い波のエネルギーに耐えられるような頑丈な礁嶺を発達させてきた。サンゴ礁地形は、現在自然の防波堤として島々の海岸を守っている。サンゴ礁地形は、侵食と堆積のバランスによって維持されている。サンゴ群集が死滅すれば、堆積と侵食のバランスが崩れ地形の崩壊がはじまるだろう。地形が崩壊すれば、防波構造物としてのサンゴ礁の機能も失われることになる。サンゴ礁の保全・管理を進めるためには、自然の防波構造物としてのサンゴ礁地形の評価とその維持という視点も重要である。

サンゴ礁における堆積物の移動は、礁縁から礁原方向である。サンゴ礁上でサンゴや有孔虫などの生物群集が健全に生育していなければ、こうした生物による生物遺骸の生産が減少し、砂の供給も途絶えてしまう。サンゴ礁海岸の養浜や、海面上昇による島の水没を考える場合、サンゴ礁の生物の健全度を高めることが必要であることを理解しなければならない。