

## I 海の緑：サンゴ礁

### はじめに

『日本の水と緑』という総合テーマから、みずみずしい緑の森林を普通想像されるであろう。このみずみずしい緑にサンゴ礁も加えて頂きたい。サンゴ礁は清澄な海に生きて、二酸化炭素を吸収し、酸素を吐き出している。海の森林といえる。琵琶湖の西を画する断層山地に「琵琶湖パレー」という施設がある。ここのゴンドラに乗り木々を見おろして、筆者はサンゴ礁とのあまりの酷似に驚いたことがある。緑の木々は天に向かって背伸びをし、葉がたわわについた枝を大きく広げている。このような姿は海中遊泳をしてサンゴ礁を観たときのものと一致している。

サンゴ礁ほど諸科学が有機的に結びつく研究対象はない。主な自然科学分野を挙げれば、生理学、医学、薬学、生物学、生態学、化学、地質学、堆積学、古生物学、地形学、第四紀学、水理学、岩石学、年代測定学などである。それぞれの研究成果が、他の分野の研究の発展に影響を及ぼしている。もちろん、社会学や（文化）人類学などの人文系の研究も盛んであるが、ここでは自然科学分野の成果について述べる。サンゴ礁を語る場合、サンゴ礁の生命現象、その歴史、そして地質・地形という順序が最も適切のように思われるのである。

### 1. サンゴ礁の生命現象

#### 1・1 サンゴとは

筆者がサンゴ礁 coral reef の研究者であることを知る人は、あの宝石のサン

ゴを筆者が秘蔵していると思って、笑いながら半ば本気で「サンゴを少し分けて」とのたまう。サンゴ礁を構成するサンゴは、桃太郎が鬼からかすめ取った桃色サンゴ、赤サンゴ、白サンゴなどでは無く、採取が禁止されているにもかかわらず伊勢や沖縄のお土産屋に陳列されている安い方の白いサンゴなのである。お土産屋にはこぶし大の枝サンゴが多く、筆者の見立てではこのほとんどはイシサンゴ目ハナヤサイサンゴである。

サンゴ礁を彩るサンゴには、指で押すと、肉のすぐ下に骨格を感じるものと、柔らかいものがある。柔らかい方はよくソフトコラル soft coral というから骨格を持っている方は、ハードコラル hard coral とでも呼べる。このハードコラルの中には、特に成長速度の早いものがあり、サンゴ礁というお城を造るもの reef builder と、造らないものがある。成長速度の早いサンゴは、造礁サンゴ hermatypic coral と呼ばれ、お城を造るのに役立たないサンゴは非造礁サンゴ ahermatypic coral と呼ばれる。

造礁サンゴのほとんどは分類学上、イシサンゴ目 Order Scleractinia に属する。現在生きているイシサンゴは約100属800種からなる。Scleractinia は石のイソギンチャクというような意味である。イシサンゴ（目）はイソギンチャクに大変近い親戚なのであり、1個体が6または6の倍数の隔膜で仕切られており、イソギンチャクとともに六放サンゴ Zoantharia と称される（図1・1）。

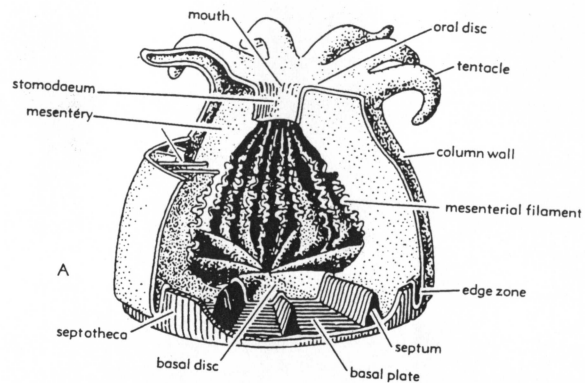


図1・1 イシサンゴのポリプと骨格(Wells, 1956, Fig.222)

ソフトコラルや宝石サンゴは1個体が8または8の倍数の隔膜で仕切られ八放サンゴ Octocorallia と呼ばれているのである。今後断らない限りサンゴと言えば、造礁サンゴを指すものとご理解頂きたい。

### 生態学的区分

造礁サンゴ——イシサンゴなど。

非造礁サンゴ——宝石サンゴなど。

### 分類学的区分

八放サンゴ——ソフトコラル、宝石サンゴなど

六放サンゴ——イシサンゴ、イソギンチャクなど

## 1・2 造礁サンゴの構造

「サンゴの群落」とか「サンゴの花園」などと言うし、枝サンゴなど外形が木に似ているものがあるため、サンゴは植物というイメージが一般にあるが、サンゴは動物の仲間である。海辺に住む子供達は、干潟でイソギンチャクの口に指を突っ込んで独特の感触を楽しむ。この口は肛門でもある。サンゴの肉体とはこのようなものと考えて頂いて良い。

図1・1にその解剖図を示す。サンゴには単体性 solitary のものと群体性 colonial のものがある。一戸建てか集合住宅かといったところ。単体性というのは、人間と同じく個人（個虫またはポリプ polyp）の肉体が独立したものである。サンゴでは群体性のものがむしろ一般的である。海中に浮遊していた受精卵が幼生（プラナリア planula）に成長し、海底（底質）に付着し、その後出芽 budding によって数千またはそれ以上の個虫が生まれる。肉体および骨格が連続しているような場合を群体性というのである。図1・2に群体サンゴの骨格の例を示す。

個虫 polyp の上には口兼肛門があり、口の回りには触手 tentacle がリング状に取りまく。触手には刺胞 nematocyst と呼ばれる矢が入っており、これで獲物をとらえる。個虫の組織は、他の動物門には珍しく中胚葉 mesoderm を欠き、二つの胚葉からなっている。すなわち、個虫を包む外胚葉 ectoderm（皮層 epidermal layer）と胃腔 gastric cavity に面する内胚葉 endoderm（gastric layer）からなる。この間にはゼリー状のもの mesoglea が入っている。

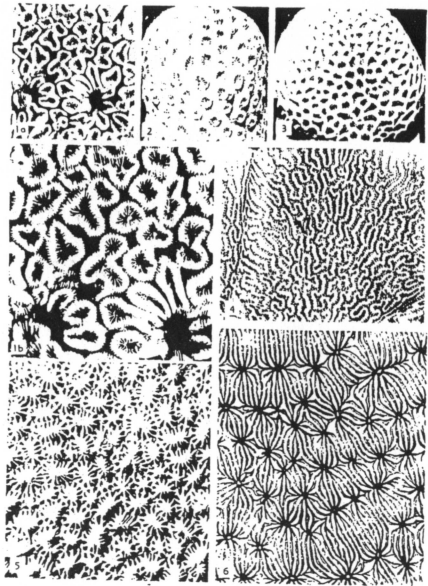


図1・2 現成のイシサンゴの骨格 (Wells, 1956, Fig.249)

- 1a, 1b. *Caulastrea tumida* (phaceloid), 2. *Favia speciosa* (plocoid)
- 3. *Goniastrea pectinata* (cerioid), 4. *Leptoria phrygia* (meandroid)
- 5. *Hydnophora microconos* (hydnochoroid), 6. *Pavona crassa* (thamnasterioid)

造礁サンゴの生殖については山里 (1991) に詳しいが、その一部を紹介しよう。ヤングらの大堡礁 the Great Barrier Reef での観察では、ハナヤサイサンゴの幼生放出は月齢時期に同調して、年間12回生じる。水温の季節変化の激しい沖縄では、冬の4カ月は生じない。大部分のサンゴは年に1回の生殖期があり、満月後何日というようにやはり月齢とのつながりがある。人の女性の生理や出産も月齢との関係が深く、天体と生理のつながりを感じずにはいられないのである。

### 1・3 光合成と炭酸ガスの固定

造礁サンゴは褐虫藻と共生している。共生しているが故に、サンゴの骨格が急速に形成される。造礁サンゴと呼ばれる所以である。褐虫藻 zooxanthellae は動物とも植物とも考えられる葉緑素を持った単細胞生物で、図1・3に見ら

れるように胃腔に面した内胚葉の細胞間に入り込んでいる。

造礁サンゴから光を遮断して飼育するとやがては死滅する。造礁サンゴが生きていく上で、褐虫藻は重要な役目を果たしていることは確かなようである。葉緑素を持ったこの褐虫藻はサンゴ表面1cm<sup>2</sup>当たり約150万个も棲息し、サンゴ礁1m<sup>2</sup>当たり1000億個に及ぶという。日中の褐虫藻の酸素の生産量と1日の褐虫藻及びサンゴの酸素消費量を比べると、酸素の生産量が消費量の数倍に及ぶという。サンゴ礁から酸素が生産されているのである。サンゴ礁が海の森林である所以である。

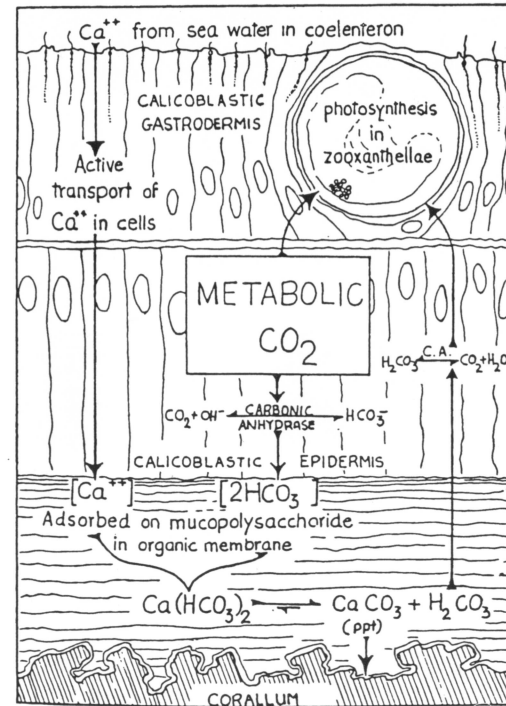
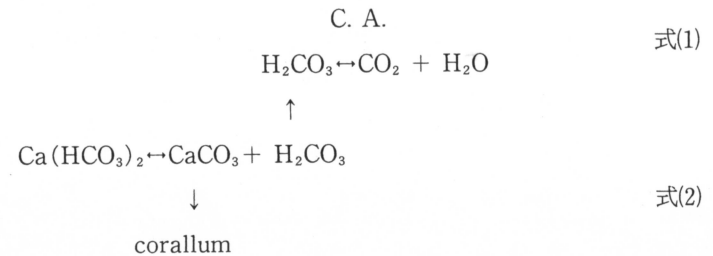


図1・3 造礁サンゴ胃腔下の横断面と骨格形式のしくみ (Goreau, 1959)

造礁サンゴから酸素が生産されているのである。サンゴ礁が海の森林である所以である。

サンゴの生体内では次のような反応によって炭酸カルシウムが沈着し、サンゴ骨格 corallum が形成される (図1・3, Goreau, 1959の説)。



式(2)で形成された炭酸は、式(1)の右辺の炭酸ガス  $CO_2$  が褐虫藻によって吸収されることによって、分解が進む。式(2)の矢印の上の C.A. は、carbonic anhydrase の略で、炭酸脱水酵素の働きを示す。式(1)の作用によって、式(2)が進み、サンゴ骨格が形成される。炭酸ガスの固定がなされたわけである。

生命の誕生後、地球の大気の組織は徐々に変化をした。現在のように酸素ガスが大気全体の5分の1に達するまで多くなったのは、植物の炭酸同化作用によるもので、炭酸カルシウムを骨格にもつ有孔虫などの植物プランクトンや、サンゴ礁の働きは高く評価される。

### 1・4 造礁サンゴの色

熱帯の動植物にはカラフルなものが量・種類ともに多い。熱帯魚や造礁サンゴは、サンゴ礁の大きな魅力である。サンゴの肉自体は透明なものが多いのであるが、褐色に見えるものが多い。これはサンゴの肉が透明なため、褐虫藻が見えているのである。サンゴの肉の中の褐虫藻の数は多く、時には重量からみてサンゴの肉の量を越えてしまうことがあるくらいである。緑、紫、ピンクなどを示す場合はサンゴ自身がその色を呈しているのである。

### 1・5 サンゴの生育条件

筆者が地質調査所の白嶺丸に乗った際、深さ数千mの海底からのドレッジ試料に単体サンゴを目撃し、驚いたことがある。これは非造礁サンゴで、北極や南極、深さ6000m以上の海溝にも棲息している。

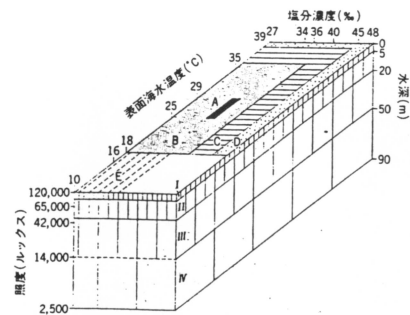


図1・4 造礁サンゴの生育条件(堀, 1980, 図1) J. W. Wells(1957)などから整理したもの。  
 A：最適条件の範囲  
 B：多量の造礁サンゴが活発に生育する範囲  
 I：最も活発に生育する深度  
 II：生育が盛んな深度  
 III：造礁サンゴが通常認められる深度  
 IV：ごくわずかしが認められない深度

これから述べる生育条件は、造礁サンゴのものである。造礁サンゴやサンゴ礁の分布は熱帯やその周辺海域に限られているので、サンゴ礁は極めて熱帯的なものといえよう。サンゴ礁の生育条件の基本的なものは、海水の塩分濃度 salinity, 水温 water temperature, 光合成のために十分な光(照度) light (illuminance)である。光を得るためには、浅い海底や清澄な海水が必要である。図1・4に堀(1980)が整理した塩分濃度、表面水温、水深に関するおおよその生育条件を示す。

塩分濃度： 全海洋(外洋)の塩分濃度はおよそ35パーミルであり、生育の許容限度に入っているため、局地的要因として重要である。陸から真水が流れ込む河口付近では、サンゴ礁は一般に形成されず、エスチュアリー estuary または水道(サンゴ礁の切れ目) reef path ができる(図1・5)。



図1・5 ポナペ島の海図(向井, 1980, 図13, 海上保安庁水路図誌の複製)

されない訳は、塩分濃度とともに河川から供給される泥にある。多少の泥は触手で取り除くが、それにも限界がある。

サンゴの属別の塩分濃度に対する生存能力の実験結果を次に示す(Vaughan and Wells, 1943)。インド太平洋で最も栄えているミドリイシ *Acropora* の場合、40パーミルの海水では半日で死んでしまった。ルリサンゴ *Leptastrea*

では3ヶ月以上棲息し続けたのである。サンゴの種類による違いは大きい。潮が引いてサンゴ礁が離水しているところへ、多量の降雨があった時の観察があるがこれによれば、塩分は25パーミルになり2日以内に半分の種類が死んでしまった。サンゴ礁原 reef flat (後述) では、干潮時に激しい太陽に照らされるし、このような豪雨やスコールもあるため、生活環境が極めてきびしい。それゆえ、特徴的な生物相が分布しているのである。

海水温度： これは海域によって差が大きいため、サンゴの広域的分布の要因として重要である。図1・4に示した表面海水温度は平均値ではなく、そのものの値である。次の節にサンゴ礁の定義を述べるが、サンゴ礁が形成されるための最寒月平均水温は18°Cであるという。しかしながら、Vaughan and Wells (1943) によれば、18°Cが長く続くとほとんどのサンゴは生き続けられないという。琉球列島の例では、最寒月平均水温20°C線がサンゴ礁分布限界とほぼ一致している。

水温は、造礁サンゴの最大棲息深度、属の多様性の地理的分布、造礁サンゴ及びサンゴ礁の成長率と関連している。サンゴの種類が熱帯地域から離れるに従って少なくなることは容易に予想されると思う。例えば森林でも、その植物相は高緯度ほど、貧弱になっていく。なお、例えば温帯林には熱帯林には無い種類の木々が出現し、高緯度になると寒帯林の構成種が混じる。これとは異なり、造礁サンゴの属構成は高緯度になるほど確実に属数が減り、新しい比較的寒い海域に住む属というものは追加されないのである。

照度： 共生藻類の光合成のためには、光が必要である。光の強度は水分子などによって散乱されるため、水深が大きくなるほど小さくなる。造礁サンゴの生育深度は150mにまで達するが、サンゴ礁は50m近くの深さまでしか形成されない (Wells, 1957)。このWellsの成果は、Motoda (1939, 1940) の基礎的研究に深く依存している。図1・6から分かるように、造礁サンゴの種類は水温や溶存酸素に依存せず、照度または放射エネルギー radiant energy に依存し

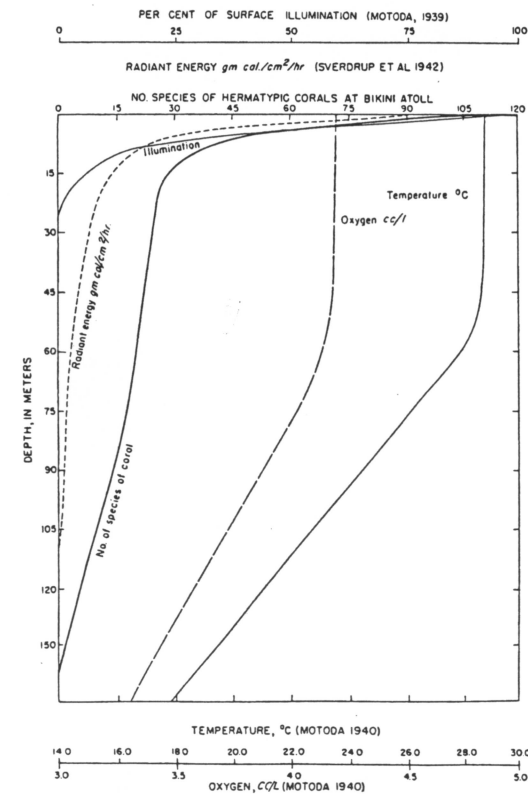


図1・6 深度、酸素、水温、照度、放射エネルギーに関する造礁サンゴの地理的分析 (Wells, 1957, Fig. 1)

ている。もちろんこれは、造礁サンゴの体内に生きている共生藻類のためであろう。種数と照度の関係は共生藻類を持つ他のサンゴ礁生物 reef organisms や皮殻状石灰藻 crustose algae にも認められる。Hess *et al.* (1937, Wells (1957) の引用) によると、カナリア諸島北方のマデイラ Madeira 諸島のフンシャル Funchal では (北緯33度)、『昼』dayの時間は深さ20mで11時間、30mで5時間、40mではわずか15分に過ぎない。

赤道直下を除くと、日の長さ、照度には季節変化がある。緯度が高くなるにつれ、照度の限界効果は著しくなる。照度は深度だけではなく、海水の清澄度

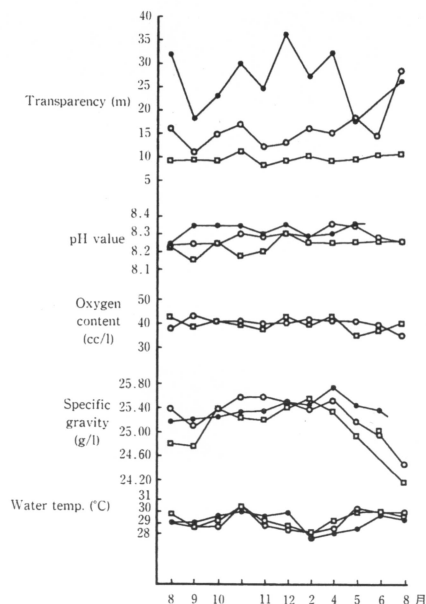


図1・7 湾(□), 礁湖(○), 外洋表面(●)の水環境 (Motoda, 1949, Fig. 2) 上から, 透明度(m), pH, 溶存酸素(cc/l), 比重, 水温(°C)を示す。

にも関係する。外洋は清澄であるが、陸域に近づくにつれ懸濁物質が増し、そして閉塞度の高い礁湖 lagoon (後述) ほど濁り、照度も低くなる(図1・7)。サンゴの分類が多少わかる者であれば容易に気づくことであるが、照度はサンゴの生活型 life form を変える。この理由を Goreau(1963) [山里, 1991 から引用] は次のように言う。

深いところでは、サンゴの骨格の成長速度は低下するが、軟組織はプランクトン摂食により維持されるので、軟組織に対する骨格の割合が小さくなり、浅所では半球状のサンゴ体が深所では円板状になる。

山里は、その例としてパラオ月影潭(ゲツエイタン)のパラオハマサンゴ、パラオクサビライシが水面直下では円錐形、深さ10mでは扁平になっているこ

とを示した。上の Goreau の説明は、生活型の変化を消極的に捉えているが、太陽光のより効率的な摂取をするための変化というようにより積極的に捉えることも可能と思われる。

### 1・6 オニヒトデ

サンゴ礁の破壊因子としては物理・化学的なものが大きい、生物による破壊もある。先に述べた成育条件をたとえ満たしていても、種々の破壊因子の洗礼を受けることになる。ウニ、穿孔貝 boring shell による穿孔、スズメダイやチョウチョウオなどの魚によるポリプの食害がある。ブダイ buffalo fish はイシサンゴを噛みきり(前歯)、砕いて(咽頭歯)、骨格ごと食べる。サンゴの成長のほぼ1/3は魚による食害で抑えられるという。

なんとと言ってもオニヒトデによる食害が圧巻である。オニヒトデは Crown of thorns starfish と英語では称する。学名は *Acanthaster planci* という。「人手」のイメージとはほど遠く、体中央から10数本のトゲトゲの青い腕が出て、多数の刺の先は赤く、トゲに刺されると激痛を味わう。オニヒトデの摂食方法は次のようである。消化管(胃や腸)を口から外に反転して出してしまい、それでサンゴの表面を覆い、包み込む。さらに消化液を分泌しサンゴの肉を消化吸収してしまうのである。その結果、サンゴは白骨化してしまう。複雑な表面を持ったサンゴを摂食するには大変有効な方法と言える。

オニヒトデはその外観から、サンゴ礁の悪漢の代表と見えるが、苦勞知らずと言うわけでもない。直径20cmのオニヒトデで年間1200万粒の卵を産む。放卵の直後から幼生の間は、小魚やイシサンゴに食べられる。変態して底生生活を始めて後サンゴ藻を食べる生活を始め、直径8mmになったところからイシサンゴをも食べ始めるのである。直径20cm(最大60cm)という成体となっても、メガネモチノウオなどの魚やホラガイに食べられるのである。オニヒトデはほぼ1年で6㎡のサンゴを食べる。オニヒトデも好き嫌いがあるようで、ミドリイシ *Acropora*, ハナヤサイサンゴ *Pocillopora* をまず食べる。いずれも浅いサンゴ礁に多い種類で、オニヒトデにとって好都合といえる。

サンゴに群れをなして覆いかぶさるようすは、なかなか凄絶である。オニヒトデの「異常」発生に対し、「平常」という言葉を使うことができるならば、サンゴ礁での平常の分布密度は5時間探して1~3匹見つけることができる程度である。異常発生というのは、ある海域のサンゴ礁のサンゴがほぼ絶滅する現象を言うと考えて良い。

オニヒトデは単独で行動するときは夜行性で昼間は陰に隠れているが、集団で行動するようになると昼間も表面に出てくる。一面にオニヒトデがいる、という場面に遭遇することになる。山里(1980, 1991)によると、オニヒトデ軍団はサンゴ礁外洋側礁斜面下部に集結し、サンゴを食いながら上へと登り、ついには礁縁に達する。そして礁縁 reef edge に列を成し、汀線に平行に隊を組み、礁原 reef flat, 礁池 moat へと進行し、ついには自ら飢餓地獄に陥り、オニヒトデ軍団は崩壊するという。山里の次の言葉を引用しよう(一部変更)。

オニヒトデの繁殖は自然の周期的変動の一つであるからオニヒトデの退治を人間はしない方が良く、という意見もある。そうかもしれない。1969年にはじめて沖縄島で大量出現の兆しが現れて20年が経過しているが、いままお各地にオニヒトデ集団が残存している。これは人間による駆除が間引きの効果を起こし自然の周期を引き延ばした結果かもしれないのである。

この節の記述は、主に山里(1980, 1991), Reader's Digest(1984), 森(1986)などに拠っている。

## 2 サンゴ礁形成の歴史

### 2・1 サンゴ礁とは

サンゴが生きていれば、そこはサンゴ礁だと思っている人がいる。「紀伊半島のサンゴ礁」なんていう表現がマスコミや観光関係者から出る。このような使

い方を耳にするたびに、「温泉だと思ってわざわざ出かけ、沸かし湯と聞」いた時の悔しさに近い思いをする。造礁サンゴが活着しているだけでその場をサンゴ礁とは言えない。サンゴ礁の地質学的または古生物学的定義は次のようなものである。

1. 原地性 autochthonous = in situ en
2. 消波構造 wave-resistant structure, wave-damping structure /
3. 堆積粒子の生物的結合構造 sediment-binding biotic structure

原地性とは、サンゴなどが生きていた時の位置をそのまま保っているか、それに近い保存状態であることである。原地性の反対は異地性 allochthonous。生物的結合構造とは、陸から供給された岩石粒子やサンゴ礁で形成されたサンゴ破片などを包み込み、波などに負けない強固な組織を造るものである。消波構造は、生態学的な規定である。波に抗する生活型をサンゴの群体は持っていなければならない。地形も然りである。図1・8にビキニ環礁 Bikini Atoll の風上礁 windward reef 海側のスケッチを示す。この地形は縁溝縁脚系 grooves-and-spurs system と呼ばれ、激しい波を弱める力をもつ。

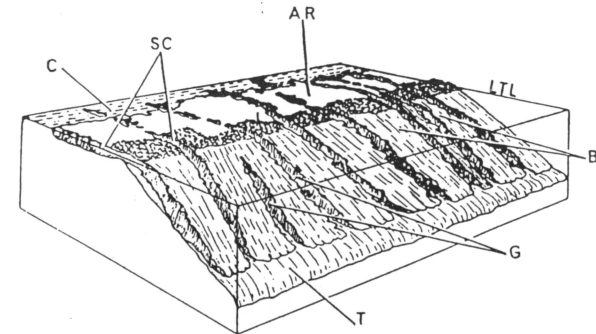


図1・8 ビキニ環礁の風上礁の礁前面および礁嶺付近の概念図 (Munk and Sargent, 1954)

AR: algal ridge 藻嶺, B: buttresses or spurs 縁脚,  
C: coral reef flat 礁原上の現成サンゴ,  
G: grooves 縁溝, LTL: low tide level 低潮面,  
SC: surge channels サージチャンネル, T: terrace (ca. -10m) 海底段丘

## 2・2 サンゴ礁の定義

## サンゴ礁とバンク

地質学的には、地層中のサンゴの堆積物をサンゴ礁 reef とするか、バンク bank or organic bank とするかは重要な問題である。というのは地層から生態学的復元を行うことは地質学の大きなテーマの一つだからである。地層から見て、原地性のサンゴ化石が集積しておれば、「サンゴ礁」と従来考えられる傾向があった。サンゴ礁は上の3つの条件を満足していなければならないのであるが、十分にこのような観点からの検討が行われなかったのである。地質学で厳密にバンクとするのは、第2、第3の条件を持たないものをいう。

現在生成中のバンクの例として、ノルウェーの海底のものを挙げる事ができる。ここでは4°C、深度-90メートルながら、最大厚60メートルの構造物を形成している (C. Teichert, 1958)。地質時代の例では、二畳紀のカピタンリーフが挙げられる。これはニューメキシコ州とメキシコの国境のデラウェア盆地のもので長さ640kmもあり、かつてN.D. Newellなどによってオーストラリアなどと同様、堡礁（後述）と考えられてきた。

## バイオハームとバイオストローム

E. R. Cumings (1930) によれば、バイオハーム bioherm はサンゴ礁とバンクの両方を含む概念である。この用語は生態学的規定が無いため、地質学の分野で大変重宝されてきた。

バイオストローム biostrome の用語は、一般に成層し、異地性の化石床に用いられるが、Cumings (1932) によって定義された時には原地性、異地性の明確な区分はなかった。その後いくつかの定義があるが、混乱があり、使用しない方がよい。

## サンゴ礁本体とサンゴ礁複合体

サンゴ礁と呼ぶ場合には狭義のものと広義のものがある。狭義のものはサンゴ礁本体であり、広義のものはサンゴ礁複合体である。サンゴ礁本体は先のサ

サンゴ礁本体 reef proper = サンゴ礁核 reef core  
サンゴ礁複合体 reef complex (Henson, 1950)

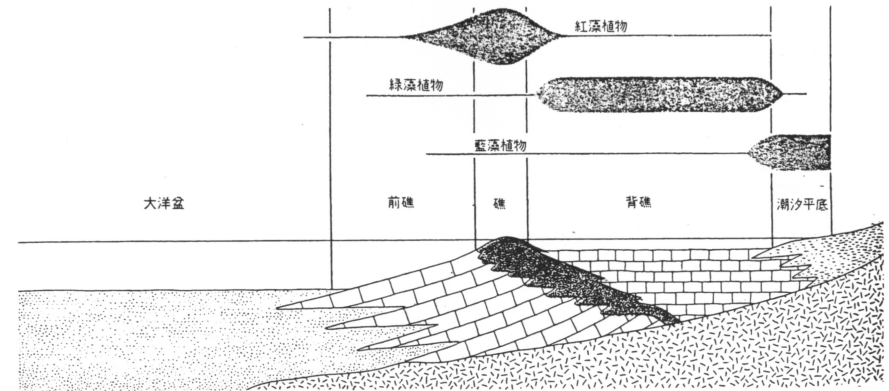


図1・9 サンゴ礁複合体縦断面図(ニューウェル, 1972)

ンゴ礁3条件を備えたものである。サンゴ礁複合体は例えばオーストラリアのグレートバリアリーフのようなものである。図1・9にサンゴ礁複合体の概念図を示す。サンゴ礁複合体は下記のように、3つの区からなる。地層は当然、

サンゴ礁複合体 = 背礁 back-reef + 礁本体 + 前礁 fore-reef

下から上へと堆積する。サンゴ礁本体 (図1・9下段の礁としている黒色部) はこの図では、右下から形成され始め左上に展開している。サンゴ礁本体は基本的に原地性でフレームが強固であるが、この海方および陸方の前礁・背礁は未固結で主にサンゴ礁本体から供給された破片からなる。典型的な礁の9割以上は細粒の砂状碎屑物で、1割に満たないものが堅い石灰藻類の堆積物やサン



ゴ骨格そのものから出来ているのである。

サンゴ礁と呼べるものはすべて、サンゴ礁複合体であり、図1・9の礁本体の斜めに打たれた杭を抜けば、このサンゴ礁の構造物は一気に崩れさるものなのである。

先のサンゴ礁の定義に関する記述は、かつて筆者が東北大学で受けた森 啓先生の講義に基づいている。

### 2・3 地質時代の礁

熱帯の海に分布している生物集団である礁にはほとんどすべての動物門が棲息し、陸上の熱帯降雨林にも匹敵するもので、歴史上最古の生態系である。この時代は20億年前まで遡るといわれる。この礁は、過去何度か大量絶滅の危機に曝されてきた。それゆえ化石礁は、地球の大変動を記録しているといえる。

地球の年齢は46億年である。Armstrong and McDowall (1974) の地球年代尺度が一般に信頼されているがカリウム40の壊変定数の改定に伴い、松本・柴田 (1977) は再計算を行った。これによると先カンブリア時代と古生代の境界年代は5.7億年前、中生代の始まりは2.5億年前、新生代の始まりは6500万年前になる。古生代以来4度の礁群集崩壊期がある。その1回目は5億年前ごろで、古杯類 *Archaeocyatus* が絶滅した。数十億年前に発生した個々の群体が数十mの高さに成長するストロマトライト stromatolite は絶滅を免れた。2回目の崩壊期は3.5億年前の古生代デボン紀終わりであり、1回目の絶滅期以後に発生した層孔虫 stromatoporoid、床板サンゴ *Tabulata* はこの2回目の崩壊期に絶滅した。この絶滅の理由として猛烈な大陸性気候の存在が有力視されている。古生代の末2.5億年前に3回目の崩壊期が訪れる。この時期には、ストロマトライト、緑藻類、フズリナ、腕足類、海百合などが絶滅する。この時期には、陸生、海生動物の多数が絶滅した。この原因として、大きな浅海であったテチス海 Tethys の消滅が考えられている。

中生代三畳紀中期 (2.3億年前) には現在のサンゴ礁を構成するイシサンゴが出現する。白亜紀には空前の最盛期を迎え、現在のサンゴ礁の主要構成物であ

る有孔虫、石灰藻 (サンゴ藻) などがサンゴ礁群集を形成することになる。その後、数回盛衰を繰り返す。特に大西洋の拡大による新世界と旧世界の礁群集の特化は注目して良い。二枚貝のルディスト rudist は一時イシサンゴに取って代わろうとするが、4回目の崩壊期に突如死滅してしまう。イシサンゴも3分の2が絶滅した。この崩壊期は6500万年前の白亜紀末で、白亜紀後期にいた動物全科の実に3分の1が絶滅したのである。この原因として、造山運動→陸域の拡大→気候の寒冷化という図式が有力視されている。

新生代になると中生代白亜紀と打って変わって、寒冷化傾向が続く。大西洋の拡大が続き、新旧海洋のサンゴの種の分化が進む。中新世 (2000万年前) には、南極に氷冠が形成される。今我々が生きている第四紀 (170万年前以降) は氷河時代と呼ばれ、10万年オーダーの氷期・間氷期が繰り返されており、これに対応して、サンゴ礁も氷期には回帰線の間 (between the Tropics of Capricorn and Cancer) に避難し間氷期には南北緯度30度にまで発達するということを繰り返しているのである。

この2・3節の礁群集の崩壊期に関する記載はニューウェル (1972) に基づいている。

### 2・4 サンゴ礁の分布

サンゴ礁の分布を図1・10に示す。サンゴ礁が熱帯・亜熱帯特有の構造物であることは周知の事実であるが、熱帯の海だからといってサンゴ礁が分布しているわけではない。サンゴ礁はインド太平洋海域では東インド諸島海域を中心に、大西洋では西インド諸島海域を中心に分布している。三大洋の東岸にはアフリカ大陸西岸のようにほとんど分布しないか、極めて限られた海域にしか存在しないのである。これは何ゆえだろうか。大陸の西岸では図1・10に見られるように、寒流 (破線) が流れ、熱帯水塊を低緯度側および西方に押しやっている。さらに図1・10には示されていないが深海からの冷たい流れ (湧昇流) の影響で、水温がサンゴ礁形成に十分な水温 (年最低水温18°C) に達していないのである。一方、大陸の東岸では暖流によって熱帯水塊が緯度30度付近まで

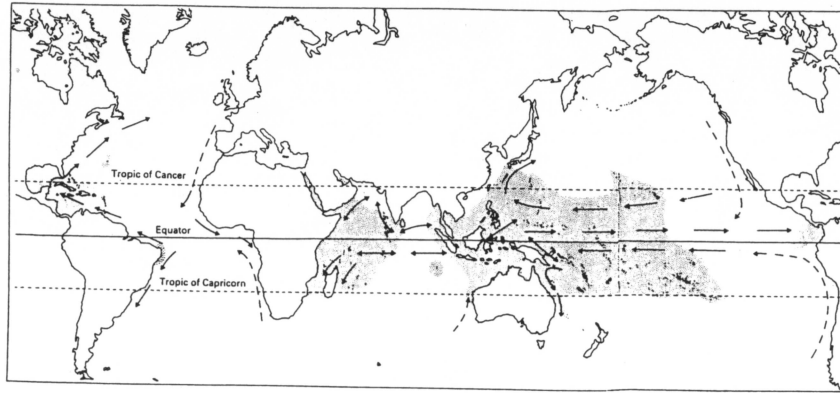


図1・10 現成サンゴ礁の分布 (Sheppard, 1983, Fig. 1)  
 網：サンゴ礁の分布地域，実線の矢印：暖流，破線の矢印：寒流

押し上げられている。

三大洋の西側にサンゴ礁が発達する理由はもう一つある。サンゴは藻類と共生しており、光合成をするためせいぜい数十m前後の浅い海底を必要とする。浅い底質ほどサンゴ礁の成長速度も大きい。この浅い海底が現在栄えている造礁サンゴの発生以来、三大洋の西部に広く分布し続けてきたのである。

サンゴ礁の発達には河口付近では発達しにくいことは生育条件の節で述べたが、図1・10に見られるように、アマゾン川からの泥の流出のため、カリブ海のサ

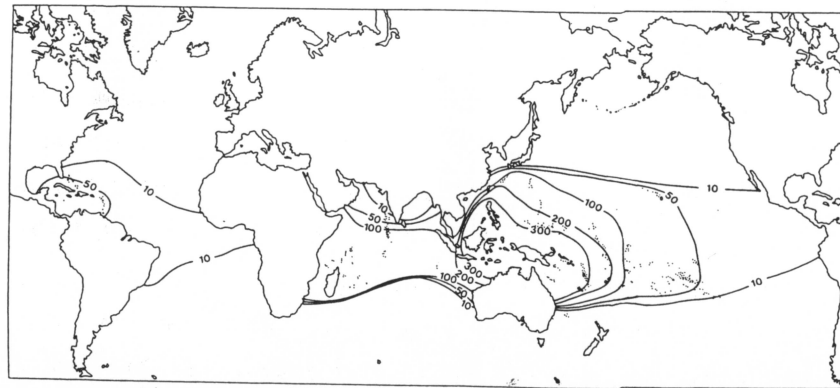


図1・11 現成の造礁サンゴの種数分布 (Sheppard, 1983, Fig. 2)

ンゴ礁は赤道側に勢力を拡大することが出来ないでいる。

図1・11には、サンゴの種数の分布が示されている。インド太平洋全域では500種に及ぶが、大西洋では全体でも約75種に過ぎない。種数の認識は研究者によって異なることもあって、数字そのものに絶対的な意味は無いといえるが、相対的に議論するには問題は無い。この図によれば、大西洋のサンゴ多様性はインド太平洋と比べて極端に少ないといえる。

大西洋とインド太平洋では生きているサンゴの種類も異なる。共通の種が無い。それゆえ両地域のサンゴ群集は別のグループであることがわかる。しかし、属→科と分類学上の水準を上げて行くと共通性が高くなる。それゆえ両海域のサンゴの祖先は同じであり、その後独自の進化を遂げてきたことがわかるのである。

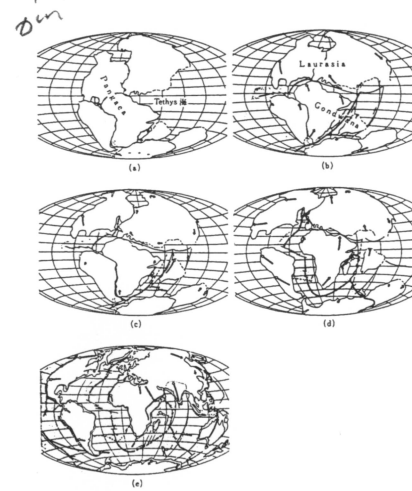


図1・12 Pangaeaの分裂史 (上田・小泉, 1979, 図2.33, ただし、原図は Dietz & Holden, 1970)  
 (a)ペルム紀末, (b)三畳紀末, (c)ジュラ紀末, (d)白亜紀末, (e)現在

図1・12は、超海洋パンサラサ Panthalassa に囲まれた一つの超大陸パンゲア Pangaea が分裂して、現在に至る様子である。二畳紀 Permian 以前はパンゲアは一体であった。図1・12 (a) はちょうど地球史最大の生物の絶滅期のものである。太平洋はこのテチス海を含むすべての海域とも考えられる。分

裂は中生代の始め（三畳紀の始め）に始まり，三畳紀の末には大西洋の中心部が生まれた（図1・12（b））。第三紀のパナマ地峡の隆起まで太平洋と大西洋はつながってきたのである。

太平洋の西部は現在の海流の動き（図1・10）から推定できるように，赤道に沿った暖流の緯度方向への動きの終着点である。サンゴの幼生はこの海流に浮き沈みして，太平洋の西部に集まる。高緯度側に暖流が離れると，サンゴは水温が低いために死に絶えてしまう。このように新しい礁建設の担い手であるイシサンゴからなるサンゴ礁はテーティス海から始まり，そして展開し現在のインド太平洋の西部海域に受け継がれるのである。大西洋の種の多様性が低い理由は，過去から受け継いできた生物資源の低さと，太平洋からみて東側に位置していたことであろう。

この節を記述する上で，Sheppard (1983) が特に参考になった。

### 3 サンゴ礁の地質と地形

#### 3・1 環礁

サンゴ礁複合体には下記の3つのタイプがある。高校時代の地理で時系列的に裾礁→堡礁→環礁と習っていた筆者にとって，ダーウィンの『サンゴ礁』（Darwin, 1842）の章立てが環礁から始まっていることは驚きであった。しかし，これは次の引用を読んで頂ければお分かりになるだろう。

裾礁 fringing reef

堡礁 barrier reef

環礁 atoll

たいていの航海者は大洋に浮かぶサンゴ礁を，環礁，堡礁，裾礁などという言葉で（その出現形態から）区別していた。このうち，環礁（atoll or lagoon islands）が最も注目を引いていた。私はガラパゴスからタヒチに向

かう途上，水面からわずかに顔を覗かせているサンゴ礁島のすこぶる奇妙な輪をいくつも見た。この輪の内側（礁湖またはラグーン lagoon）には静かな水が湛えられており，これは陽光を反射して淡いコバルトブルーに輝いていた。ここは大海を渡ってきた船の絶好の碇泊所となった。この輪は海面にまで達したサンゴ礁からなり，この上には目にも眩いばかりの白い砂浜に縁どられてココヤシが青々と繁る島々があった。これらの島々は幅狭く，高さも数mに満たない。茫漠たる大洋の中に忽然と現れる環状のサンゴ礁は，強力で倦むことを知らぬ波浪と闘い，水中に沈められずにいるのである。この環礁の直径は小さいもので10km，大きいものでは30kmあるのも珍しくない。

栄養塩類が少ないといわれる熱帯の海にあって，サンゴ礁の生物は美しく多様である。砂漠中のオアシスといってよいだろう。科学者ならずとも熱帯の海を航海した者ならば，このような環礁の形成過程に疑問を持つことだろう。

事実，この環礁の成因に関する問いかけは古くからなされてきた。それゆえ，サンゴ礁の形成というよりは，環礁の形成が長く議論されてきた「サンゴ礁問題」といえよう。

#### 3・2 陸島と洋島，高い島と低い島

地球の表面の7割は海洋に占められている。海洋は単に海水を湛えているということだけで，大陸と区別されるものではない。両者を構成する岩石の違いが，大陸を高くし，海洋底を低くしている。大陸を構成する岩石は軽く，海洋底の岩石は重い。軽い大陸が海洋底に比べてより高く浮くのは理の当然である（木庭，1987b）。

島を認識する上での有効な区分の一つに，陸島 continental island と洋島 oceanic island がある。陸島は大陸地殻によって構成され，洋島は海洋地殻によって構成されている。海に浮かぶ島といっても，それを構成する岩石によつ

で分けられるのである。陸島の例としては、グリーンランド、日本列島、インドネシアの島々などがあるし、洋島の例としてはポリネシアの島々などが挙げられる。これらの分布には明瞭な規則性がある。陸島はグリーンランドのような安定陸塊の一部を構成するものと、日本列島のように造山帯を構成するものがある。後者の島々の多くは要するに、環太平洋造山帯を構成する島々と考えて良い。これらの島々は、海溝を伴うことが多い。洋島の多くも太平洋に分布する。洋島を構成する岩石は基本的に海洋を構成する玄武岩である。「基本的に」と断った理由は、稀にかつての大陸を構成した岩石からなる場合があるからである。このような洋島は古島弧または残存弧と呼んだりする。

陸島は歴史的に見て大陸と地続きになったことが多く、陸島に棲息する動植物は近くの大陸のものや近縁のものが多い。洋島の陸上生物は一般に大陸との関係は薄く、島特有のものが多い。ダーウィンが『種の起源』ではじめて記載したガラパゴス諸島の生物のごとくである。

島の別の有効な区分に、高い島 high island と低い島 low island がある。この概念を使って太平洋の島の分布図を、デュルヴィエとロタン (1834) は作成している。ダーウィン (1842) によれば、「低い島という用語は厳密に言って、一般に外洋の風や波によってサンゴなどの物が打ち上げられる程度の高さにしか達していない島」を意味する。この区分と先の区分は互いに独立の関係にあるが、高い島と低い島の区分は洋島地域でより有効である。

### 3・3 ダーウィンの環礁形成説

ダーウィンの環礁形成説はどのように組み立てられていったのだろうか。ダーウィンの環礁形成説の醍醐味は、よく引用される図1・13には無く、むしろライエルのサンゴ礁形成説の見事な転回にあるのだが、これは木庭 (1987a) に詳細に示している。

ポリネシアなどには先のダーウィンの引用のように、「水面からわずかに顔を覗かせているサンゴ礁島のすこぶる奇妙な輪」が多数分布するのを見ることができる。すべてが「低い島」からなる海域である。洋島で島が高くそびえるた

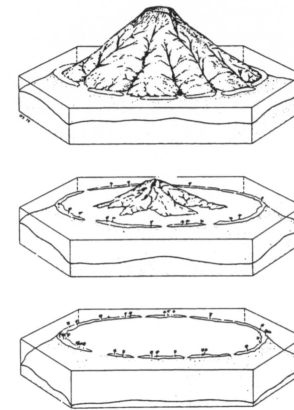


図1・13 ダーウィンの堡礁・環礁形成モデル(Hopley, 1982, Fig. 1.1) デービス(1928)の図に基づく。  
上図：裾礁，中央図：堡礁，下図：環礁

めにはハワイ島のように必ず火山でなければならないが、このような火山が無い海域がある。このように広い「低い島の海域」は、熱帯のサンゴ礁海域にしか分布していないのである。

『ライエル (Lyell, 1832) の卓抜な地球観に基づいたダーウィンの洞察』を以下に示そうと思う。活発に火山活動がある海域なら、必ずハワイのように火山が海上に出現しているはずである。造礁サンゴは熱帯の中核海域でも通常数十mしか棲息できないから、サンゴ礁からなる低い島があるということはかつてそこに火山があったはずである。とはいってもたくさんの火山の山頂が海面すれすれに揃うということはありません。ハワイ島を例にとると、マウナケアが4205m、キラウエアが1243mという具合だ。

広大な海域にサンゴ礁からなる低い島しか分布していないということは、この海域では火山の生成が終焉したことを意味すると考えて良いだろう。後に図1・13を使って示したいと思うが、その過程で環礁群が形成される。その結果形成されたのが広大な「低い島の海域」なのである。これ以外の過程でこの海域を説明できないと筆者も思う。とはいえ、ダーウィンのこの説は同時代人々に必ずしも受け入れられた訳ではない。ダーウィンが亡くなるほぼ一年前の手

紙を引用してみよう。

もしも私が間違っているのなら、いますぐ頭上に一撃を食らってやつつけられてしまってもよいと思う。海洋底で広域にわたる永続的な沈下が起こらなかつたら、とする方が私には奇妙に思われる。誰かすてきな金持ちが思い立って、太平洋とインド洋のいくつかの環礁でボーリングをして、深さ500または600フィートから試料を持ってきてくれたら……。

このダーウィンの夢はこの10年余りに実現する。そしてダーウィンの考えの正しさが実証されるのである。

成 環礁の形勢を述べた従来のテキストでは内外を問わず、ダーウィンのサンゴ礁形成説を説明する際に、いままで述べた考えはおおよそ無視される。そのため、学生だけではなく、研究者もダーウィン説を正しく理解している人は少ない。驚いたことに20世紀になって提出されたデーリー (Daly, 1915) の水河制約説とダーウィンの沈降説を並べて議論し、後に述べるエニウェトク環礁とピキニ環礁のボーリングによってダーウィンの沈降説が正しかったことが分かった、としたり、折衷的な説明が一般的なのである。

### 3・4 サンゴ礁の地形区分

図1・9にサンゴ礁の概形を示す。この地形はサンゴ礁の3タイプのうちの裾礁と言って良いが、礁 (サンゴ礁本体) とその海側の前礁、背礁は堡礁・環礁にもあり、この点で図1・9はすべてのサンゴ礁を表していると考えてよいであろう。すでに「サンゴ礁の定義」で述べたように、サンゴ礁の中心は礁 (サンゴ礁本体) にあると言って良い。この礁の地形を簡潔に述べたいと思う。

広義の礁原はサンゴ礁のおよそ海面にまで達した平坦な部分を言い (図1・15最上部では地形断面のほとんど)、礁斜面 reef slope は海洋底に面してそれから聳えるサンゴ礁を構成する斜面を言う (図1・8では、右側手前の斜面)。狭義の礁原は礁池を除いた平坦面を言い、図1・15では reef crest, sea level

platform と示した部分に該当し、sea level platform はもちろん、reef crest も面自体は侵食起源といえる。礁原の多くは、過去のサンゴ礁が造った構造物なのである。低潮時には干出するため、この面上のプール中には塩分濃度や温度の変化に強い *Goniastrea aspera* など限られたサンゴが棲息している。

サンゴ礁の成長点は、新鮮な空気と多量のプランクトンをもたらす外洋の波がぶつかる礁縁 reef edge (礁原の一部) と礁前面 reef front (礁斜面の一部) にあると言って良い。礁縁は礁原の海方端の部分で、図1・8の例のようにサージチャンネル surge channel (図中のSC) の分布する礁原の領域である。ここには、太平洋の風上側の礁原と礁斜面が示されている。太平洋の礁縁では石灰藻嶺 algal ridge からなる礁嶺 reef crest が認められることが多い。礁前面は礁斜面の上方部に位置し、礁斜面のうち造礁サンゴ・石灰藻が共に活発に棲息している場をいう。

図1・14には、グレートバリアリーフ中央部 (タウンズビル Townsville) 沖

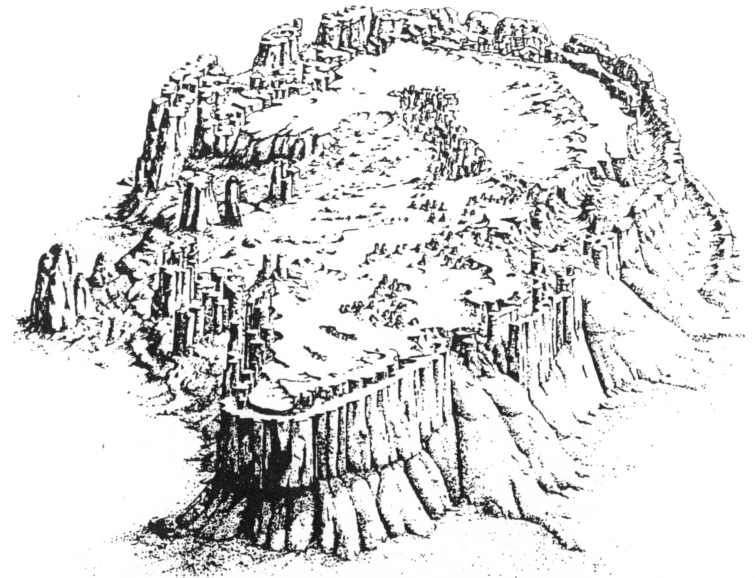


図1・14 グレートバリアリーフのバイパーリーフ (Reader's Digest, 1984, p.81 の図)

の大陸棚縁辺にあるViper Reef (マムシ礁) が示されている。サンゴ礁は岩のように聳え、海洋底から海面にまで達している。この図の海洋底から聳えている岩様の外洋斜面はすべて礁斜面と呼んで良い。この礁斜面はほぼ中央で2つに分けることができ、下部のものは更新世、上部のものは完新世～現在に形成されたものである。

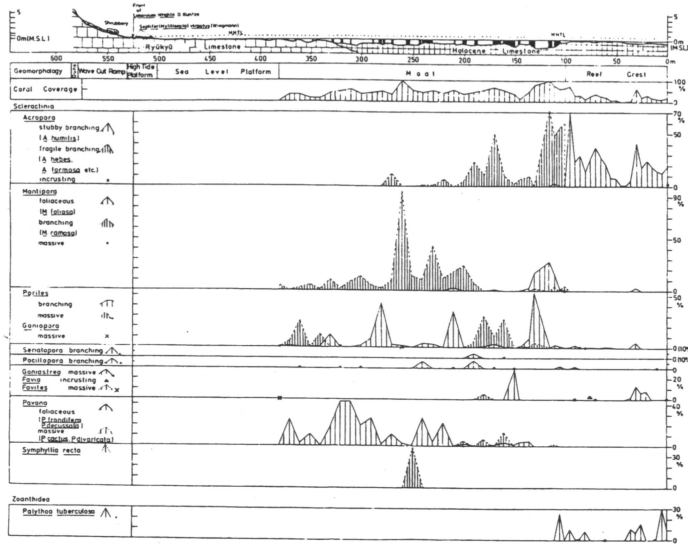


図1・15 石垣島大浜のサンゴ礁地形とサンゴ带状構造 (Takahashi and Koba, 1978, Fig. 2)

図1・15にはサンゴ礁嶺から内陸の地形断面とサンゴ礁の带状構造が示されている。サンゴ礁を構成するサンゴが地形に対応して見事な住み分けをしている。この断面のサンゴ礁石灰岩は2つの時代のものからなり、内陸部は更新世の琉球石灰岩、海方は完新世のサンゴ礁石灰岩である。琉球石灰岩からなる中潮位プラットフォームと完新世の礁嶺の間には、数mの凹地がある。礁原の幅がほぼ200mを越えると形成される。これは礁湖とは呼ばず、礁池という。

ミドリイシ属 *Acropora* は礁嶺と礁池前方部の代表的な属であり、礁嶺部では波力に対して丈夫な種が、礁池では比較的弱い種が分布する。ミドリイシと

同科のコモンサンゴ属 *Montipora* は礁池前方に葉状種が卓越し、礁池の中央部から後方部には枝状種が卓越している。礁池前方部では潮通しが良く、このような環境にミドリイシや葉状コモンサンゴが好んで棲息するし、礁池後方部では水の汚れが目立ち、このような環境でも枝状コモンサンゴは棲息する。このようにサンゴの棲息場は生態的な位置 *ecologic niche* と密接な関連がある。それゆえ、このような現成サンゴ礁のデータをもとに、化石化したサンゴ礁の地形の復元や生態区分も可能となる。

### 3・5 海水準変動とサンゴ礁形成

海面の高さは海洋が誕生して以来、上下振動を繰り返してきた。第四紀すなわち氷河時代に入って、10万年オーダーで氷河の消長が繰り返され、これに対応して海面高度すなわち海水準の上下が繰り返された。氷期には高緯度地域や高山地域では氷床や氷河が形成され、水が陸上に滞留した。その結果、海水準は100m前後も低下したのである。氷期に挟まれた間氷期には、これと逆に陸上の氷は融けて、海面は同程度、上昇したのである。厳密には現在も氷河時代の間氷期ではあるが、後氷期と呼ばれている。

図1・18の右の曲線は、海水準変動曲線を表し、これに対応するサンゴ礁の形成ステージを付加している。この左には、この海水準変動に対応するサンゴ礁の堆積過程を踏まえたサンゴ礁複合体を示している。サンゴ礁の形成過程は、現成サンゴ礁や化石サンゴ礁のデータに基づいて求めるはずである。図1・18の左図は、主に琉球列島の現成・化石データから得られたパラメータ値をもとにしたシミュレーションの結果である。図中の当時線は1000年間隔である。この図の示すところを次に簡潔にまとめる(木庭, 1980)。

1) 急激な海水の侵入とともに、谷の部分では三角州扇状地性の砂礫層や泥層が、ほぼ海面の上昇に対応して堆積していく。

2) 氷期が終了し、気候が急激に温暖化すると、琉球列島の気候や水温はサンゴ礁形成に十分となる。初めの海進速度は15mm/yで、サンゴ礁の上方成長速度5mm/yをはるかに越えている。サンゴ礁と言うにたる構造を造ろうとする

が溺れていく。この時期のサンゴ礁をパイオニアリーフ pioneer reef と呼ぶ。これには、サンゴ礁特有の消波構造が備わっていない。パイオニアリーフは、陸源物質が供給されない山脚部でよく発達する。

3) 海進速度がサンゴ礁の上方成長速度とほぼ一致するか、下回るようになると (約 3mm/y), まず礁前斜面堆積物として, Cycloclypeus-Operculina 層が堆積したようである。この層は谷の部分では陸源堆積物の直上に載り (図 1・18), 山脚部ではパイオニアリーフの直上に堆積した。その後サンゴ礁は海面に一致した礁原を持ち, 消波構造も備えるようになる。この時期には主にサンゴ礁の上方成長が目立つ。

4) 海進速度がさらに低下し, 海面がほぼ安定すると (約 0.5mm/y), サンゴ礁はもっぱら海方へ前進していく。もちろん前進のためには基盤が必要であるが, 礁前斜面堆積物とその役割を果たす。ジャマイカの礁前斜面では, サンゴ礁本体に織り込まれる炭酸塩量の 2~4 倍が, 礁から離れたところで堆積するという。上方, 海方成長を示すサンゴ礁をプログレッシブリーフ progressive reef と呼ぶ。

5) 海退過程のサンゴ礁をリグレッシブリーフ regressive reef と呼ぶ。海退過程では, 水温も下がり, 造礁能力も落ちる。海退過程も海退速度の違いによって 2 時期に分かれる。モデルでは 10m 海面が下がった時に造礁能力が無くなるようになっている。これ以降は今までのサンゴ礁構造物を破壊する過程になるが, モデルには示していない。

### 3・6 裾礁→堡礁→環礁→卓礁

図 1・13 は, 広大な海域にサンゴ礁からなる低い島々が並ぶ理由を, 図式的に示している。ある広大な海域に高さの異なる多くの火山島があって, その火山島がやがて沈下していく。そういう過程の中で一つの島が環礁になる様子が, 図 1・13 に示されているのである。この図は, デービス (Davis, 1928) がダーウィンの簡潔な図をより分かりやすく示したものである。実をいうと, デーヴィンは絵がうまくない。それに対しデービスの描写は説得力がある。

a) 図 1・13 上は裾礁 fringing reef である。火山島の海岸線に沿ってサンゴ礁が形成されている。

b) 図 1・13 中央は堡礁 barrier reef である。島がサンゴ礁の成長速度よりゆっくりと沈み, サンゴ礁が「溺れない」のであれば, 島とサンゴ礁の間の浅い海が出来る。この浅い海は礁湖 lagoon と呼ばれる。サンゴ礁がこの礁湖を埋めても良い筈であるが, そのような地形は見られない。というのは, 前述したように一般にサンゴ礁の成長点は外海の波が直接ぶつかる礁前面 reef front や礁縁 reef edge であり, 相対的に礁の後背部は凹地になる。このようにしていったん凹地が出来ると, 砂や礫が堆積しうる凹地では波によって砂や礫が移動し, サンゴが棲息することは難しくなる。波が及ばない深い礁湖では, 水が還元状態になり, サンゴが棲息する事はさらに難しくなるのである。

図 1・13 のように単一の火山島であれば, 裾礁の時のサンゴ礁の平面形はほぼ円形を示す。サンゴ礁の成長速度が海面の上昇速度より早ければ, サンゴ礁の成長能力は外洋方向への成長に任せられる。図 1・9 のようにサンゴ礁本体部は沿岸から離れ, 海方に向かう。海面の上昇速度が相対的に早くて, サンゴ礁の成長力が上方への成長にしか回らない場合には, 堡礁・環礁は裾礁時代の直径を維持することになる。

c) 図 1・13 下は環礁である。火山島は沈没してサンゴ礁のリングだけが残される。環礁のリングのサイズは過去の火山島の大きさ, 島の沈降速度, 海水準変動, 気候変動などの歴史を反映しているといえる。図 1・16 に堡礁と環礁の海図の例を示す。

d) 以上の 3 タイプに, 田山 (1934) は卓礁 table reef を追加した。これは, 欧米のサンゴ礁研究者にも高く評価されている。田山 (1934) はこの論文で卓礁を成因とは無関係に形態によって定義した。論文が邦文で書かれているため, 欧米の研究者はこれをダーウィンの珊瑚礁の 3 タイプの次に続くものとしてしか理解しなかったようである。田山のライフワークである 1952 年付け報告書では, 卓礁が明確に環礁に続くものとして意識され, そこで提出された図にも表現されている。

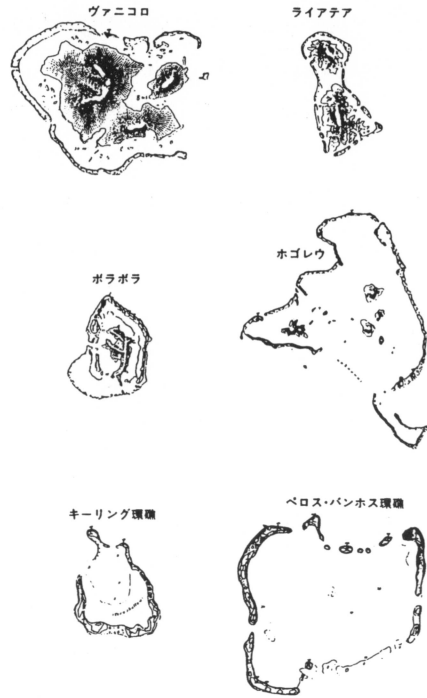


図1・16 堡礁と環礁の海図(C. Darwin, 1842による。  
ただし、ここで掲載している図は、木庭, 1987aの図3)

田山 (1934) は、多くの卓礁は絶海の孤島として存在し、大洋底から聳えるとした。図1・17に田山のトコベイ (トビ) 島の例を示す。南洋群島の卓礁の例では、サンゴ礁の周囲の最大はメジチ島の9 km, 最小はグリメス島の3.2 kmである。卓礁では、礁原上に唯一の珊瑚小島 sand cay が分布し、その平面形は礁のそれに相似する。田山はダーウィンのサンゴ礁形成説を敷衍し、サンゴ礁の成長力と火山島の沈降速度との関係で卓礁の成因を考えたようである。

次に、筆者の卓礁の生成説を示そう。火山の斜面が数度の傾斜しか持たないのに対し、サンゴ礁は数十度の急傾斜であり、数千mも沈降して環礁が形成された場合、極めて不安定な様相を示す。すなわち環礁の周辺のサンゴ礁は、重力で崩落していくことであろう。そのようにして痩せてきて、ついには図1・

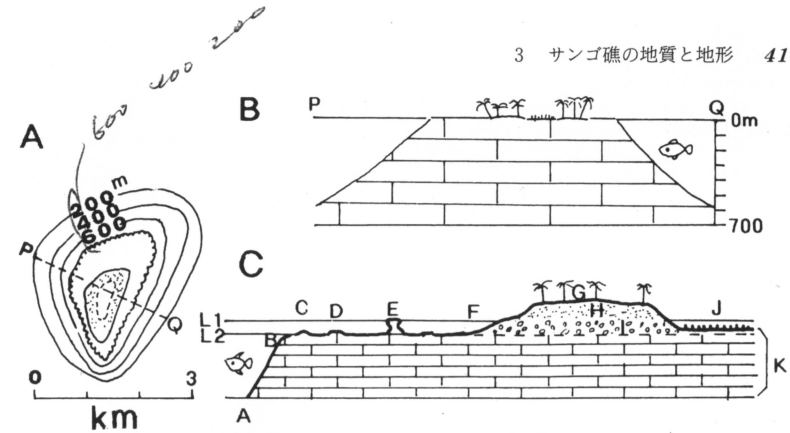


図1・17 卓礁の例～Tokobei島(Tobi島) [田山(1934)の図を改変]  
図A：平面図、この図で「波状の縁取り部」は礁縁で、「砂地」はサンゴ小島の高まりで、中央部の「破線で囲んだ場所」は凹地  
図B：図A上の断面線PQの垂直断面図  
図C：図A上の断面線PQ付近の礁縁からサンゴ小島の高まりにかけての模式断面。  
AB：礁前面, B：砕波帯(礁縁), C：石灰藻嶺, D：旧礁原面,  
E：茸岩(mushroom rock), F：礁原とビーチの境界,  
G：離水ビーチ(集落が立地), H：砂層, I：礫層,  
J：サンゴ小島の中の凹地(タロイモの栽培地), K：完新世サンゴ礁石灰岩

17のような小規模のサンゴ礁になるのではないか。日本では南鳥島が卓礁の例であり、隆起卓礁としては沖大東島を挙げることができる。

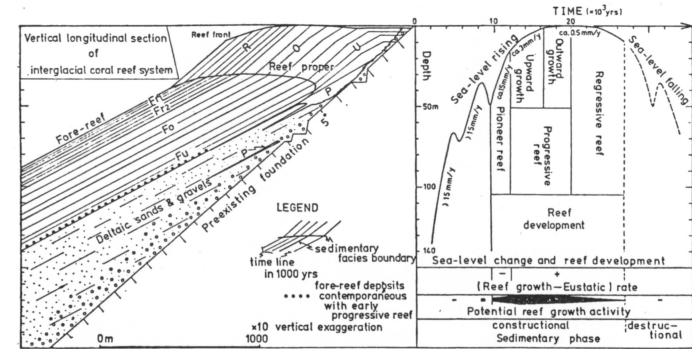


図1・18 海進過程のサンゴ礁形成モデル(木庭, 1980, 図2)  
Fr1, Fr2：リグレッシブリーフの礁前斜面堆積物,  
Fo：プログレッシブリーフの外方成長時の礁前斜面堆積物,  
Fu：プログレッシブリーフの上方成長時の礁前斜面堆積物



## 3・7 裾礁・堡礁・環礁の分布

ダーウィン (1842) は、『サンゴ礁』の本の最終章として「サンゴ礁形成説に関連してのサンゴ礁の分布」を置いた。図1・19はその一部であり、私たちが比較的良好に知っている海域をここに示している。ダーウィンの原図では環礁は薄い青色、堡礁は濃い青色、裾礁は薄い赤色、火山は濃い赤色で塗られている。前2者はいずれも沈降地域のサンゴ礁地形であり、後2者は隆起地域の地形と考えられている。このグループ化は図1・19から見ても分かるように、見事な対応を見せているのである。このようにして考えられる隆起地域と沈降地域の区分は現在私たちが知っている地殻変動の傾向と一致している。そして、この隆起・沈降の分布は、プレートテクトニクスで見事に説明されるのである。

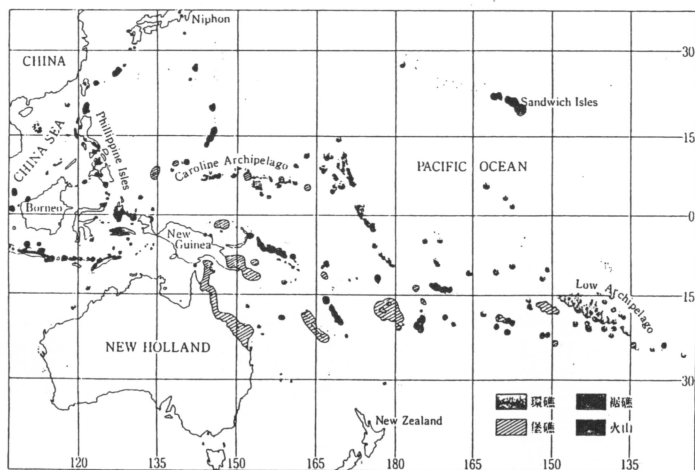


図1・19 ダーウィンのサンゴ礁分布図の一部 (木庭, 1987a, 図8)

## 3・8 サンゴ礁地形と生活

サンゴ礁の白い砂浜に立つと、礁原の海側の端(礁縁)で高波が白く砕けているのを見ることが出来る。外洋で生まれた高波はこの礁縁で壊れ、エネルギーが吸い取られる。これより陸側には穏やかな寄せ波が走るだけである。ここ

では大きな魚が集まっているため格好の釣り場となる。しかしながら、比較的穏やかな波の日でも稀に発生する腰がつかかる程度の波に押し倒され、戻り波で縁溝 grooves or surge channels そしてトンネルの中に引きずられて帰らぬ人が出ることも少なくない。

サンゴ礁は島に住む人々にとっては、重要な防波堤でもある。筆者が初めて琉球列島へ調査に出たのは夏であった。夏の海は静かで、サンゴ礁の調査には適していた。しかし台風が近づいたり、上陸することが多く、高波が岸辺に押し寄せる様を見ながら数日を過ごすことが多かった。サンゴ礁の外縁では10mを越える高波も、砂浜では1~2mの波に急激に減衰していった。サンゴ礁が島を守っているという感を強く抱いたものである。これに対し、礁原をほとんど持たない絶海の洋島である大東島で台風に遭ったが、大東島ではサンゴ礁が極めて狭く(理由あり)、10mを越える港の人工プラットフォームを高波が洗い、2トントラックが引きずられていったのである。

図1・13上図の火山島には、雨水が流れて形成された放射状の谷が示されている。この河口には裾礁が形成されていない。つまり裾礁の連続性が、河口で絶たれている。この礁原の切れ目をリーフパス reef path, reef gap, or reef break と呼ぶ。島が沈降する過程でも元の河口部にはサンゴ礁が形成されず、環礁においても礁の切れ目は保持されている。何ゆえに河口部ではサンゴ礁が形成されないのか。サンゴの生育条件の節で述べたように、サンゴは海水または海水に近い塩分濃度を必要とし、真水で塩分が薄められる所には棲息できない。さらにサンゴは清澄な海水を必要とし、河口から供給される泥やシルトに弱い。一度このように切れ目ができると、この部分がサンゴ礁の后背の堆積物の外洋への通路になり、この堆積物がこの切れ目を削り、この切れ目を閉じることができなくなるのである。図1・14には、礁原后背に堆積したサンゴ礁砂礫が外洋に流出し、海底扇状地を形成している様子が示されている。

リーフパスは、船のサンゴ礁内への入口となっている。ここから鮫や亀などの大型生物が礁湖に入る。紅海の裾礁は世界で最も大規模なものである。紅海沿岸の考古遺跡はすべてと言って良いほど、海方にリーフパスを持つという。

人も文化もサンゴ礁地域ではリーフパスが重要な通路になったのである。図1・5は堡礁の海図である。この中にはたくさんの暗礁がある。砕波帯の内側にあるため、砕け波の存在で暗礁に気づくことができず、外洋の荒波を避けるために礁湖に入った船が少なからずこの暗礁（ノル knoll）の犠牲となった。

外洋から打ち寄せた波は礁原を越え、礁湖（礁池）に入る。礁湖の水位は外洋と比べて高く、そのため波が打ち寄せる合間に外洋の水位との落差が生じて、礁湖から滝のように外洋へ海水が排出される。この潮流は激しく時速10km前後で、船や人は一気に沖へ流される。この潮流は離岸流 rip currentの一種といえる。

この水路は、ボートチャネル boat channel or back reef moat と勘違いされるが、ボートチャネルは礁原後背の深さ・幅とも数mというような小規模の海岸線や礁原に平行な水路である。ここは水が停滞しており、子供達の水浴の場所になったり、海藻の収穫場所になったりする。

この章の多くが木庭 (1987a) および中近東文化センターでの1991年4月の講演に基づいている。

### おわりに

ビキニ環礁、ムルロア環礁などの原爆および水爆実験とサンゴ礁研究の関係は有名である。アメリカ合衆国が1945年に決定し、その翌年、翌々年にビキニ環礁で実施した原爆実験は十字路作戦 Operation Crossroads と呼ばれる (Ladd, 1973)。このあと、エニウェトク環礁などでも原水爆実験が十数年先まで行われた。実験の前後に、地質学、生物学、海洋学、地球物理学による学術調査が実施された。ちなみに、第1回目の実験には、42,000人が参加し、ビキニ環礁の直径30km余りの礁湖には200隻の船が碇泊したのである。虫の撃退のために大量のDDTが散布され、放射能汚染以外の汚染も進んだ。ビキニの島民は数年前アメリカによって帰島が許されたが、土壌は汚染され、とうてい昔の様な生活が出来ないことが分かった。広島と比べものにならない量の放射性物

質が蓄積しているのである。まことに残念ながら、これらの作戦を通じてサンゴ礁研究のデータは飛躍的に蓄積されたのである。

サンゴ礁での原水爆実験と日本とは、「第5福竜丸」被曝事件でつながる。1954年～1962年の間に100回を超える原水爆実験がビキニなどで行われたが、この最初の実験時に焼津港から出漁していたまぐろ漁船「第5福竜丸」が被曝した。1991年10月アメリカの「第5福竜丸」に関する外交文書が公開され、同月25日前後の日付の各紙によれば、アメリカ政府の要請を受けて日本政府は事件直後に船を日本政府の手で処分することを決定したことが明らかとなった。焼津港から未公開で東京に回航、東京水産大学の練習船にして「はやぶさ丸」と変え、大幅に改装してカムフラージュ。廃船処分にするため解体業者に払い下げられた。契約書には「屑化することを義務づける」と明記されていた。当時船の墓場と言われたゴミの海（現夢の島）に捨てられて船底に大きな穴が開けられていたものが発見され、反核運動のうねりの中で76年6月「第5福竜丸展示館」が開設された。再度確認したいのであるが、「第5福竜丸」被曝事件は原水爆実験を中止させる力にはならず、これ以降10年近くも激烈な原水爆実験が実施されるのである。世界の人々に太平洋の島民もサンゴ礁も見えなかったといえるのではないか。

パラオ諸島を中心とする海域を昭和初めに日本は占拠した。地域の人々には日本語を国語として使うことを強いるなど、この種のエピソードは多い。戦前、日本人のサンゴ礁研究はこの地を中心に発展した。地学研究で文化勲章を受けた数少ない研究者である東北帝国大学の矢部長克を中心に熱帯パラオ研究所が戦前パラオに建設されて、サンゴ礁研究の黄金時代が現出した。戦争とサンゴ礁の研究につながりを見ざるを得ないのである。

日本のサンゴ礁地域すなわち琉球列島は現在、リゾート開発や空港の建設などで揺れているが、はるかに深刻なのは膨大な面積を占める米軍の軍事基地の存在である。日本の米軍基地専用面積の実に75% (1982.9 現在) を沖縄 (約24,839ha) が占めている。

原水爆実験、政府による証拠隠滅、島民支配、観光開発、戦争、これらはも

もちろん、サンゴ礁と直接のつながりはない。サンゴ礁地域の自由・平和の問題は、環境問題よりも南北問題などとの関連で考えた方が良くと筆者は考えている。そして、至極残念なことであるが、学術研究はサンゴ礁の自由・平和とは無縁と言わざるを得ない。

## 引用文献

- 堀 信行, 1980. 日本のサンゴ礁, 科学 (岩波), Vol. 50, No. 2, pp. 111-122.
- 木庭元晴, 1980. 海進過程のサンゴ礁形成. 『西村嘉助先生退官記念地理学論文集』, 古今書院, pp. 54-59.
- 木庭元晴, 1987a. ダーウィンとサンゴ礁. 『生きてる太平洋』, 神戸新聞出版センター, 139-176.
- 木庭元晴, 1987b. 海底地形と海流—黒潮大蛇行とエル・ニーニョ. 『地理学トピックス』, 大明堂, pp. 21-24.
- 森 啓, 1986. サンゴ 不思議な海の動物. 築地書館, 197p.
- 向井 宏, 1980. 海図のみ方. ニューサイエンス社, 119p.
- ニューウェル, N. D., 1972. 礁にみる地球の歴史. サイエンス (日本経済新聞), Vol. 2, No. 8, pp. 52-64. (高柳洋吉訳)
- 田山利三郎, 1934. 珊瑚礁の一形式 卓礁 (Table reef) に就て. 水路部要報, 第13巻, (第6号), pp. 225-232.
- 田山利三郎, 1952. 南洋群島の珊瑚礁. 水路部報告, 第11号, 292p.
- 上田誠也・小泉 格, 1979. 海洋プレートの運動. 岩波講座『地球科学』, Vol. 11, pp. 49-114.
- 山里 清, 1980. サンゴの大敵—オニヒトデ. 『琉球の自然史』 (木崎甲子郎編著), 築地書館, pp. 200-204.
- 山里 清, 1991. サンゴの生物学. 東京大学出版会, 150p.
- Darwin, C. R., 1842. The Structure and Distribution of Coral Reefs. Smith, Elder and Co., London, 214p.
- Daly, R. A., 1915. The Glacial-control theory of coral reefs. Proc. Amer. Acad. the Arts and Sci., Vol. 51, pp. 155-251.
- Davis, W. M., 1928. The Coral Reef Problem. Amer. Geogr. Soc. Spec. Publ., Vol. 9, 596p.
- Goreau, T. F., 1959. The physiology of skeleton formation in corals, I. A method for measuring the rate of calcium deposition by corals under different conditions, Biol. Bull., 116, pp. 59-75.
- Hopley, D., 1982. The Geomorphology of the Great Barrier Reef:

- Quaternary Development of Coral Reefs. John Wiley & Sons, 453p.
- Ladd, H. S., 1973. Bikini and Eniwetok Atolls, Marshall Islands. In O. A. Jones and R. Endean (eds) "Biology and Geology of Coral Reefs". Academic Press, New York, pp. 93-112.
- Lyell, C., 1832, Principles of Geology. Vol. 2, J. Murray, London, 330p.
- Motoda, S., 1939. Submarine illumination, silt content and quality of food plankton of reef corals in Iwayama Bay, Palao. Palao Trop. Biol. Station Stud., Vol. 1, pp. 637-649.
- Motoda, S., 1940. Comparison of the conditions of water in bay, lagoon and open ocean in Palao. *ibid.*, Vol. 2, No. 1, pp. 41-48.
- Munk, W. H. and Sargent, M. C., 1954. Adjustment of Bikini Atoll to ocean waves. Prof. Pap. U. S. Geol. Surv., 260-C, pp. 275-280.
- Reader's Digest, 1984. Great Barrier Reef. Reader's Digest, Sydney, 384p.
- Sheppard, C. R. C., 1983. A Natural History of the Coral Reef. Blandford Press, U. K., 152p.
- Takahashi, T. and Koba, M., 1978. A preliminary investigation of the coral reef at the southern coast of Ishigaki Island, Ryukyus. Sci. Rep. Tohoku Univ., 7th Ser. (Geography), Vol. 28, pp. 49-60.
- Wells, J. W., 1956. Scleractinia. In: Treatise on Invertebrate Paleontology (Edited by R. C. Moor), pp. F328-443.
- Wells, J. W., 1957. Coral reefs. Geol. Soc. America, Mem., Vol. 1, pp. 609-631.
- Vaughan, T. W. and Wells, J. W., 1943. Revision of the suborders, families, and genera of the Scleractinia. Geol. Soc. Amer. Spec. Pap., Vol. 44, pp. 1-363. (木庭元晴)