## サンゴ礁裾礁における空間構造把握のための 自然地理的ユニットの設定

## 与論島東部サンゴ礁を例に

## 中井 達郎\*

## Physiographic Unit for Understanding the Spatial Structure of the Coral Reef Ecosystem at the Yoron Island Fringing Reef, Ryukyu Islands

Tatsuo NAKAI\*

## Abstract

The spatial structures of a  $10^1$   $10^3$  m scale on coral reefs were understood by reading aerial photographs and investigating the topography of the fringing reef at the eastern part of Yoron Island, Ryukyu Islands. This study set a new physiographic unit (PGU) at the coral reefs as well as studied zonation. PGU has the following characteristics. (1) In an aerial photo, a linear pattern comprising micro-landform arrangements is recognized on the reef flat; (2) Seawater flowing beyond the reef crest from the open sea and entering the moat before returning to the open sea through a breakout in the reef crest or a channel flowing parallel to the shoreline constitute a very common pattern in the research area; (3) The series of currents observed in the area constitute a water system resembling a drainage water system on land and 4 systems were arranged at the eastern part of Yoron Island; (4) The movement of seawater is controlled by landforms such as reef crests, channels and lands (a cape), which might qualify as borders of PGUs; (5) Movements controlled by such landforms are dominant, and tend to be longer in terms of time. In this study, a physiographic unit is defined as follows. (1) A unit that is distinguishable from other adjacent areas by its geomorphological borders; (2) And, a unit that is distinguishable from other adjacent areas when referring to the movement systems of seawater and materials.

The notion of spatial structures of coral reefs of a  $10^1$   $10^3$  meter scale was substantiated by this research using the overlapping zonation approach known here as PGU on reef flats. The spatial structure makes a frame of the coral reef ecosystem. Therefore, setting a PGU is thought to be effective for application to coral reef conservation.

**Key words**: coral reef, fringing reef, spatial structure, physiographic unit **キーワード**: サンゴ礁, 裾礁, 空間構造, 自然地理的ユニット

<sup>\*</sup> 国士舘大学

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Kokushikan University

## I.はじめに

近年、サンゴ礁はさまざまな人為ストレスにさ らされ、大きなダメージを受けている。そのよう な現状に対して、サンゴ礁生態系が持つ高い生物 多様性が、科学的価値あるいは経済的価値として 再認識されてきている。そのために、サンゴ礁保 全の必要性が説かれ、保全を目的とした研究が盛 んになってきた(中井,1998)。ただし、それら の研究の多くは生物学的アプローチによるもので あり, 例えば, サンゴ礁に生息する生物の生理, 種構成、生物量、種間関係、種と生息・生育環境 との関係といった対象が研究テーマとされてい る。この場合に対象となる空間スケールは 10<sup>1</sup> m よりミクロなスケールである。しかし、現実の空 間での地域生態系の保全を考えた場合には、 10<sup>1</sup>~10<sup>3</sup> mのスケールで、サンゴ礁の空間構造 を把握することも必要である。例えば、海域保護 区の設定を含む持続可能な自然利用のための地域 計画や、開発計画に対する環境影響評価において は、対象地域が持つ特性や隣接する地域との関係 を、空間的に把握することが不可欠だと考える。

10<sup>1</sup>~10<sup>3</sup>mのスケールでサンゴ礁の空間構造 を把握する研究は、地形や生物が礁縁に平行に配 列する帯状構造について行われてきた。それは, 第2次大戦直後、世界各地のサンゴ礁の記載的 研究で始まった(太平洋: Ladd, 1950; Wells, 1957 など、大西洋: Goreau、1959 など、インド洋: Stoddart, 1973 など)。琉球列島においても、 Hirata (1956, 1958) や平田ほか (1971) は与論 島, Yamazato(1959)は久米島などで研究が行っ た。その後、帯状構造の研究はその成立メカニズ ムの研究へと向かった。特に、造礁サンゴの帯状 構造と波浪や照度などの環境因子との関係につい ての生態学的研究が盛んになった。特に生物群集 を基準とした区分に主眼がおかれ、より詳細な研 究が行われてきた (Barnes et al., 1971; Rosen, 1971; Geister, 1977 ほか)。これらの研究は、生 物群集とそれを取り巻く環境との関係を明らかに するという生態学的研究である。一方、サンゴ礁 の地形発達および礁石灰岩の構造を明らかにする 地形学・地質学的研究でも、帯状構造は対象と なった (Hopley, 1982; Graus and Macintyre, 1989 など)。 琉球列島でもTakahashi and Koba (1977, 1978)や Takahashi *et al.* (1985), Nakamori (1986)などのような地形学・地質学的研 究が行われてきた。

このように、帯状構造はサンゴ礁の空間構造を 把握するには欠かせない対象である。しかし、そ の研究結果は、冒頭に述べたような環境保全で は、十分に活用されていないのが現状である。そ れは、帯状構造だけではサンゴ礁の空間構造のす べてを把握することができていないためだと考え る。すなわち、帯状構造は礁嶺あるいは海岸線に 直角な縦断面上での空間構造を示すことはできる が、礁嶺あるいは海岸線に平行な方向に展開する 平面的な空間構造の把握が把握できないためであ る。そして、サンゴ礁において10<sup>1</sup> ~ 10<sup>3</sup> mのス ケールで平面的な空間構造を把握した研究はな い。

以上のことから、本研究では、サンゴ礁保全へ の応用を念頭に置き、地形学的あるいは自然地理 学的アプローチから、10<sup>1</sup> ~ 10<sup>3</sup> m のスケールで、 裾礁上の礁原の平面的な空間構造を明らかにする ことを目的とする。

#### II.研究の方法

本研究では、I章で述べた目的のため、与論島 東部のサンゴ礁(図1)を対象に、以下の方法を 用いて研究を行った。

#### 空中写真判読

1946年,1977年および1991年撮影の空中写 真を用いて,地形判読とサンゴ礁礁原上に見られ るパターンの判読を行った。

地形および堆積物に関する現地調査

図1に示した6測線について、地形縦断面測 量を行った。その際、セオドライトを用いた測量 を基本に、補足的に水深を計測した。水深は、潮 汐表を用いて補正した。

特に L-3 では、10 m ごとにステンレス製の杭 あるいはコンクリート釘を設置し、その間を黄色 のビニールコードでつなぎ、固定測線とした。地



Fig. 1 Location and outline of Yoron Island. Lines are transects of Fig. 2.

点の番号は、もっとも陸側の杭を No.0 とし、外 洋側に向かって、10 m ごとの杭あるいは釘に一 連の番号を付した。

L-3上では、縦断面測量に加え、微地形の平面 形、縦断形の計測も適宜行った。またL-3上の 各地点について、50×50 cmの方形枠を用いた 写真撮影を行い、各地点の堆積物分布およびサン ゴ類・藻類に関する生物分布を図化した。さら に、堆積物の挙動を調べるため、L-3の9地点に ペンキを塗布した砂を設置し、一定期間後の拡散 の状況を調査した。ペンキを塗布した砂の粒径 は、現地の砂質堆積物の平均的な中央粒径値 (Md $\phi$ )に合わせ、0 $\phi$ (1 mm)とした。これは 堆積物中に含まれる大型底生有孔虫砂 *Baculogypsina sphaerulata* などの骨格)の平均的な粒径 である。

なお,現地調査は,主に1980年から1981年 にかけて行い,その後適宜補足調査を実施した。

# III. 与論島東部サンゴ礁の地形的特徴と 帯状構造

与論島は、琉球列島中部の272N、12826E に位置し, 島の周囲に裾礁が発達している(図 1)。礁原の幅は、東部で広く、最大1kmを越え る。北部~東部~南東部にかけての礁原上には最 大3~4mの深さを有する礁池(浅礁湖)が存 在し、 礁原の最外部に 礁嶺が 発達する。 目崎ほか (1977)がいう'礁嶺 礁池タイプ'の裾礁である。 この地域のサンゴ礁地形の最大の特徴は、この礁 嶺の発達が非常に良いことである。すなわち、そ の高さが高く、連続性が高いことである。図1に 空中写真判読によって読み取った礁嶺の分布を示 した。北部の宇勝から寺崎、黒花、皆田にかけ て、一定程度以上の高さで連続する。大金久の沖 で、一度とぎれるが、その南から赤崎、麦屋へと 連なっている。図2は、与論島東部サンゴ礁上 の6測線で計測した地形縦断面図である。すべ



図 2 6 測線における地形縦断面図. 1:サンゴ塊あるいは塊状サンゴ,2:サンゴ・マウンド,3:砂礫,4:石灰岩,5:非石灰岩.

- Fig. 2 Landform profiles on 6 transects.
- 1: Coral Head or Massive Coral, 2: Coral Mound, 3: Sand and Gravel, 4: Limestone, 5: Non-limestone.

ての断面で礁嶺の発達が認められ,特にL-2と L-3では,平均低潮位から1m以上の高さで干出 する。

もうひとつの特徴は、帯状構造が発達すること である。帯状構造はサンゴ礁生態系の空間構造の 基本のひとつとなっている。礁嶺の外洋側には縁 脚 縁溝系を含む礁縁、陸側には礁池が配列する。 さらに礁池内は、微地形分布によって以下の2つ に帯状区分される。

サンゴ塊帯:塊状や盤状あるいは枝状などの 生活形を持つ造礁サンゴの累重によって作られた 微地形であるサンゴ塊(図3)が,密に分布する ことで特徴づけられる地形帯である。礁池内の外 洋側に広がり,図2のL-3では,No.48 ~ No. 62付近がこの地帯である。

サンゴ・マウンド帯:未固結の堆積物が作る





Fig. 3  $\,$  An example of a coral head ( At no.56 on transect L-3 ).

マウンド状の微地形で特徴づけられる地帯であ る。この微地形のうち,特に,未固結堆積物のマ ウンドに Acropora formosa などの枝状サンゴ類 が群生するものをサンゴ・マウンドと名付けた (図4)。この地帯は,礁池内の陸側に広がり,図 2のL-3では,No.0~No.48付近がこれにあた る。

各測線での微地形調査と空中写真判読の結果か ら与論島東部サンゴ礁の帯状構造を図示した(図 5)。

## IV. 微地形配列パターンと堆積物 および海水の動き

## 1) 空中写真判読で得られる微地形配列パター ン

帯状構造は,サンゴ礁に普遍的に見られる空間 構造であるが,空中写真を見ると,それ以外に礁



Arrows show dominant current directions.

池内に,八ケで掃いたような線状の構造を認める ことができる。

図 6A は、北東部の寺崎~黒花~皆田間の空中 写真を拡大したものである。礁池内に見られる線 状のパターンを図化したものが図 6B である。礁 池内外洋側では、海岸線に直角方向、礁池内陸側 では海岸線に平行なパターンを示している。

礁池内の線状パターンのうち、サンゴ塊帯では、複数のサンゴ塊が、海岸線に直角方向ないしは、一定方向に斜行するように配列することによって、線状のパターンを作っている。ただし、サンゴ塊個々の形には、大きな特徴はない。一方、サンゴ・マウンド帯では、それを構成するサンゴ・マウンドあるいはマウンドの形状が、海岸



Fig. 5 Zonation of coral reef in east of Yoron Island. 1: Reef Edge, 2: Reef Crest, 3: Coral Head Zone, 4: Coral Mound Zone.

線と平行な方向に長軸を持ち, さらに複数が全体 として指向性を持って配列する。図4は, サン ゴ群集等が同一の軸上に並んでいることを示して いる。また, サンゴ・マウンド帯の中にも Porites lutea などの大型の塊状サンゴやサンゴ塊が散在す る。塊状サンゴやサンゴ塊の背後には'尾'を引 くようなパターンが見られる。この'尾'の部分 が未固結堆積物からなるマウンドである。

#### 2) 堆積物の挙動と海水の動き

このように空中写真判読で得られる微地形配列 パターンは、微地形の成因とも関わる堆積物の挙 動と関係することが予想された。そこで、L-3測 線上で礁池内の堆積物の分布と挙動について調べ た。その結果を図7に示した。測線、測点の詳 細位置は図7Bのとおりである。

図 7A は、測線上の 6 地点での、50 × 50 cm 方形枠内の堆積物の分布と変化を示したものであ る。

堆積物分布は,陸側の No. 12, 27, 46 で,砂 質堆積物と枝サンゴ礫であるのに対して,外洋側 の No.50, 54, 58 では,それらに加えて,径

10 cm 以上の扁平なブロック状のサンゴ礫が含ま れている(図中、黒塗りの礫)。1980年11月か ら 1981 年 3 月のかけての堆積物変化を見ると、 No. 12, 27, 46 では、砂質堆積物の増減が見ら れるが、枝サンゴ礫の分布にはほとんど変化がな く、調査期間中はほとんど運搬されていない。し たがって、この枝サンゴ礫は、周辺のサンゴ・マ ウンドの枝状のサンゴ群体 (Acropora formosa など)から供給されたと考えられる。それに対し て、No. 50, 54, 58 では、径 10 cm 以上のブロッ ク状サンゴ礫の移動が確認され、特に No. 54 の 礫Gは上下が反転している。このことから、ブ ロック状サンゴ礫は、おそらく礁斜面に生息する 被覆状あるいはテーブル状のサンゴ群体 (Acropora digitifera など)が破壊され、運搬されてき たものだと考えられる。

また, 粒径 0 φ の砂にペンキを塗布し, 各 100 g を測線上の 9 地点に設置し, 10 日後に運搬の 状況を追跡調査した(1981 年 3 月 20 日 ~ 29 日)。 ペンキ塗布砂の運搬範囲は, 海中で目視確認し た。その際に用いた砂は, あらかじめ現地で採取



- 図 6 与論島北東部, 寺崎 黒花 皆田間の空中写 真と線状パターン. A:空中写真, B:線状パターン.
- Fig. 6 Aerial photo and linear patterns between Terasaki Kurohana Minata in northeast Yoron Island. A: Aerial photo, B: Linear patterns.

した堆積物をふるいにかけて準備した。図7Cに その結果を示した。陸側のNo.40,33,26,17, 0では,設置地点を起点にして,海岸線に平行な 南東方向に運搬され,指向性は高いものとなって いる。それに対して,外洋側のNo.60とNo.52 では,砂が運搬された方向は,設置地点を起点に おおむね陸方向(南方向)から東方向であるが, その指向性はそれほど強くない。また10日後に 確認された砂の量の変化は,定量的に計測するこ とはできなかったが,No.60では明らかに当初 設置した砂の量より明らかに少ない量しか確認で きなかった。同様の傾向は,No.52でも認めら れた。ペンキ塗布砂の運搬範囲は目視で確認した ため,視野の範囲内で連続的に点々と運搬されて いた場合は、追跡が容易であったが、距離を隔て て点在する場合は確認が困難である。No. 60 お よびNo. 52 で見られた結果は、そのような方法 上の限界によるものであるが、同時に、運搬様式 の違いを示唆する。すなわち、陸側の各地点で は、上記の方法で連続的に追跡可能な運ばれ方で あったのに対し、外洋側の各地点では、一気に遠 くへ運搬され、追跡不可能な運搬のされ方であっ たと考えられる。

これらの堆積物調査の結果,明らかになったの は、No.46とNo.50の間のいずれかの地点を境 に、その陸側と外洋側とで、堆積物分布とその挙 動に差異が見られることである。そして、その差 異は、作用する海水運動が異なっていることを示 唆する。

陸側では、海水の動きは礫を運搬するほどの強 さはなく、砂質堆積物を海底面に沿い、転動ある いは滑動の形で運搬するような作用が働いてい る。またペンキ塗布砂が示すように、設置地点を 基点に一方向に運ばれている。これらのことか ら、陸側では、波の作用に起因する海浜流が主に 作用しているものと考える。潮汐によって流向が 変化する潮流とは異なるものである。

一般に、海岸での波は水深が浅くなると砕波す るが、その際に生じる波高の変化が、ラディエー ション応力とそれによる水位上昇を生じ、流れを 生み出すことが知られており、海浜流と呼ばれる (堀川、1973;岩田ほか、2005;栗山、2005など)。 海浜流は、海底勾配が急なところほど規模が大き くなる(中村、1979)。サンゴ礁はその典型であ り、Tait(1972)は、サンゴ礁上で生じる水位 上昇が礁縁直前の波高の20%にもなる例を示し ている。また、Suhayda and Roberts(1977)は、 サンゴ礁礁原上の海浜流について'wave-driven current'と呼び、サンゴ礁上での水と堆積物の 移動で大きな役割を果たしていることを示した。

このような陸側の状況に対し,外洋側では,礫 の運搬が活発である。特に扁平なブロック状サン ゴ礫は裏返しになるような動きを示した。このこ とは,海底から堆積物を巻き上げる作用が働いた ことを示す。外洋側で10日後に確認できたペン





キ塗布砂の量が設置当初に比べ明らかに少なかっ たのも、巻き上げによって浮遊漂砂となり、一気 に遠くに運搬されたものと考えられる。

ー般に, 波は海水の円運動であり, 'wave base'以浅の浅海においては, 堆積物を海底か ら海中へ巻き上げる。したがって, 扁平なブロッ ク状サンゴ礫を裏返され, またペンキ塗布砂が浮 遊漂砂として運搬されたと考えられるのは, 外洋 側では波が強く作用していることを示している。

以上のように、測線 L-3 で見られた No. 46 と No. 50 の間の地点を境にした堆積物分布とその 挙動の差異は、海浜流と波の差異と考えられる。 もっとも大きな砕波が見られるのは礁縁である。 波はある空間的な幅をもって海浜流へと変化す る。両者の漸移帯となるある空間的範囲では、海 水は波の円運動を行いながらも、海浜流としての 運動も行う。特に礁縁や礁嶺の水深が大きくなる 満潮時や、暴浪時には、その範囲は、より陸側に までいたるものと考えられる。

図8に,礁原上の海水の運動をモデル的に示 した。波として礁縁にいたった海水は,砕波し始 め,徐々に海浜流へと変化する。このときの動き の方向は,礁縁あるいは海岸線にほぼ直角であ る。さらに陸に近づくにしたがって,波は減衰 し,海浜流が主となる。海浜流は,海岸線に近づ くにつれて,行く手を陸地に遮られるため,海岸 線に平行になっていく。

## 3)海水の運動パターンを示す微地形配列パ ターン

このような海水の動きは、微地形配列パターン と一致している(図8)。その理由は、海水の動 きにコントロールされる堆積物が微地形の形成に 大きく関わっているためである。

サンゴ塊帯はサンゴ塊が密集しているが、その 配列は、礁縁に直交し、波の運動方向に一致す る。この配列方向は、縁脚 縁溝系と類似したメ カニズムで決定されているものと考えられる。礁 縁では縁脚 縁溝系と呼ばれる櫛の歯状の微地形 が発達する。図8では礁嶺と礁斜面の境界にこ の微地形を図示した。縁溝部では砂礫が波によっ て動かされるため、サンゴの成長を阻害すると同 時に、海底面が侵食される。それに対する縁脚部 ではサンゴが阻害されず、地形も上方に成長する (Shinn, 1963), このようなメカニズムで作られ るため、縁脚 縁溝系は波の入射方向と同じ向き で配列する。サンゴ塊帯においても、波によって 堆積物が動かされる部分はサンゴの成長が阻害さ れ、それは線状に連続する。サンゴ塊はその間に 線状に配列するものと考えられる。

ー方,サンゴ・マウンド帯では,サンゴ・マウ ンドあるいはマウンドの形状およびその配列が, 海浜流の運動方向と一致する。塊状サンゴやサン

図 7 黒花沖(L-3)での堆積物の分布と挙動.

- A:測線上6地点での50 cm 方形枠内の堆積物分布とその変化.
- B:測線の位置.
- C:ペンキ塗布砂追跡調査結果(1981年3月20日~1981年3月29日).

凡例A

1:砂,2:枝サンゴ礫,3:プロック状のサンゴ礫,4:その他の礫,5:枝サンゴ,6:藻類,7:石灰岩,8: 撮影範囲外.

1:L-3 測線上の測点,2:ペンキ塗布砂の運搬範囲.

Fig. 7 Sediment movement on L-3 offing Kurohana.

A : Distribution and changes of sediments in a 50 cm quadrate at 6 points.

B : Position of transect.

 $\mathrm{C}$  : Result of a painted sand trace survey ( 20/3/1981 29/3/1981 ).

Legend of A

1: Sand, 2: Branching coral gravels, 3: Block like and flattened shape coral gravels, 4: Other gravels, 5: Living branching coral, 6: Algae, 7: Limestone, 8: Out of photo.

Legend of B

1: Point on L-3, 2: Distribution of transported painted sand.

凡例 B

Beach	Shallow lago	Reef	Reef	
	Coral Mound Zone	Coral Head Zone	Crest	Slope
	Nun	WAVE		
			the second s	
1	ARARA			1



Fig. 8 Seawater movement in reef flat for a model.



図 9 与論島北東部サンゴ礁での空中写真から判読された海水運動 太い矢印:波,細い矢印:海浜流,線:境界.

ゴ塊の陰となる流れの下流側では、カルマン渦の 発生による流速の低下が起こる。そのため、海浜 流によって運搬されてきた砂質堆積物が背後に堆 積する。それが繰り返され、流向に一致する方向 にマウンドが形成されていく。

なお,サンゴ塊帯は,海水運動が波から海浜流 へと徐々に変化する。そのためにサンゴ塊の背後 にも,サンゴ・マウンド帯と同様のメカニズム で,小規模なマウンドが形成される。

以上のように、微地形配列は、海水の運動によ

る堆積物の移動パターンで説明できることが多 く,空中写真にあらわれる微地形の配列パターン は,堆積物の挙動パターン,ひいては卓越する海 水の動き(波・流れ)を示すものと考えられる。

与論島北東部全体について、空中写真判読に よって得られるパターンから、海水の大局的な動 きを表すと、図9のようになる<sup>1)</sup>。すなわち、海 水は、外洋から礁嶺を乗り越えて礁地内に入り、 海岸線に沿って、東~南東~南南東へと流れ、大 金久沖の礁嶺がとぎれた部分から外洋に抜けてい

Fig. 9 Seawater movement shown by aerial photo reading in the northeast coral reef of Yoron Island. Wide arrows: Wave, Narrow arrows: Current, Lines: Boundary.

年	No	気圧	備考	年	No	気圧	備考
1951	11	935		1972	7	955	
1952	2	960		1974	18	975	
1954	5	940		1975	6	980	
1956	15	955		1976	9	950	
1957	7	930			17	935	
	14	955		1977	9	910	沖永良部台風
1959	6	970		1978	8	960	
1961	18	920	第2室戸台風		11	965	
1964	14	989		1979	20	950	
1966	13	997		1985	9	990	
	24	978		1986	8	970	
1968	10	980		1989	12	980	
1970	9	945		1990	19	900	
1971	20	985		1991	17	955	
1972	7	955					

表 1 与論島から 50 km 以内を通過した主な台風(1951年~1991年). Table 1 Typhoons that passed within about 50 km of Yoron Island(1951 1991).

:与論島をほぼ直撃した台風 気圧は、与論島に最も近い地点での観測値

<.

この地域では流速計を用いた詳細な流況調査や シミュレーションは行われていない。しかし、秋 山(1979)は同じ与論島北東部サンゴ礁で、堆 積物中の'星砂'(底生有孔虫の一種: Baculogypsina sphaerulata)の刺が運搬される過程で摩耗 することに着目し、礁池内の堆積物に含まれる '星砂'の残刺率から海水の運動パターンを示し た。図9は、そのパターンと整合している。ま た、Yamano et al.(1998)が石垣島・川平で明 らかにした裾礁上の海水運動パターンとも整合的 である。なおYoshida et al.(2006)は、Yamano et al.(1998)などの研究結果をふまえ、海水の卓越 的な運動パターンを把握するために、空中写真の 画像解析による線状パターンの抽出方法を提示し ている。

もちろん, Yamano *et al.* (1998) や Nadaoka *et al.* (2001) が指摘するとおり,潮汐や季節風, 台風によっては,海水がより複雑な動きをした り,また大きな変化を示す。しかし,空中写真に あらわれるパターンは,微地形の形成に関わるよ うなより長いタイムスケールでは、大局は変化し ないものと考える。図10、図11、図12は、そ れぞれ 1946年, 1977年, 1991年の空中写真と そこから判読した海水運動パターンである。3つ を比較すると海水運動パターンは大きな変化はし ていない。基本的に同じパターンである。気象庁 の台風に関するデータによると、1951年から 1991年にかけては、表1に示したように、与論 島は何回かの大きな台風に見舞われている。 1977年9月の台風9号(沖永良部台風)では, 与論島の北方約40kmに位置する沖永良部島で、 瞬間最大風速 60.4 m/s を記録,測候所の風速計 の鉄塔が倒れたことから、最大では80 m/s の風 速だったことが推測されている。このような台風 の際には、おそらく礁池内の堆積物は大きく攪乱 され、微地形配列も大きく変化したことが予想さ れる。Dollar and Tribble (1993)は、ハワイを 1980年におそった暴風がサンゴの帯状構造のパ ターンをほとんど完全に破壊したと報告してい る。しかし、上記の与論島の3時期の空中写真 判読結果は、次の大きな台風がやってくるまでの

(気象庁、台風経路データにより作成)



図 10 1946年撮影の空中写真(撮影:米軍). 矢印は空中写真から判読した卓越的な海水運動方向.線は海水運動の境界.この凡例は,図 11 および図 12 にも適用.

Fig. 10 Aerial photo of coral reef taken in 1946.

Arrows are dominant seawater movement direction read from the aerial photo. Lines are boundaries of seawater movements. This legend also refers to Fig. 11 and Fig. 12. The aerial photos were taken by the USAF.

数十年の間に、同じような微地形配列を回復し、 大局的なパターンは維持されていくことを示して いる。

#### 4)海水運動パターンを決定する地形

海水運動パターンを決定している要因について 検討する。

第一の要因として、礁嶺の存在があげられる。 与論島東部のサンゴ礁地形の最大の特徴として、 礁嶺が高く明瞭であり、そして連続的に発達して いることをあげた。この礁嶺の発達のために、外 洋から波によって礁原上、あるいは礁池内に入っ てきた海水は、容易には外洋に戻っていけず、礁 池内を海岸線に平行の方向に流れることになる。 もし、礁嶺の発達が悪ければ、離岸流が発生し、 このような連続的に長い距離を海岸線に平行に流 れることはないはずである。

次に,水路の存在があげられる。図1あるい は図1012を見ると与論島東部では、大金久の 沖では礁嶺がなくなり、周辺より低くなっている ところがある。他地域のサンゴ礁では、もっと明 瞭に礁嶺を切り、場合によっては礁原を大きく切 る深みがあるところがあり、水路と呼ばれる。与 論島の場合も西部の茶花の西北西に水路が認めら れる。このような深みは、礁嶺によって外洋への 逃げ場を失った海水が、外洋に出て行く出口とし ての機能を果たしている。

また,陸地の存在と海岸線の形状も重要な海水 運動パターンを決定する因子である。もし,陸地



図 11 1977 年撮影の空中写真と海水運動パターン(撮影:国土地理院).

Fig. 11 Aerial photo of coral reef and seawater movement pattern taken in 1977. The aerial photos were taken by Geographical Survey Institute.

が存在せず、背後が海だとすれば、礁嶺を乗り越 えてきた海水は、そのまま方向を変えることな く、海へと出て行く。深く広いラグーンを持つ環 礁や堡礁の場合は、そのような流れになり、陸地 に隣接してサンゴ礁が発達する裾礁だからこそ海 岸線に平行な流れが生じるのである。海岸の形 状、特に岬の存在も海水運動パターンを決定づけ る。図1あるいは図11で、島南東部の赤崎は岬 となっており、礁原の幅が周辺に比べて狭くなっ ている。このようなところでは、外洋から入って きた海水は、より幅が広く、断面積(河川でいう 河積)が大きい方に流れる。そのために岬を境に して流れの方向が異なっていく。島北部の賀義野 付近の流れの境界も、岬の効果が働いている可能 性があるが、ここでは、岬地形が赤崎ほど明瞭で はなく、むしろ流出機能を持つ水路との位置関係

235

も関係していることも考えられる2)。

以上のように、礁原上の海水運動パターンを決 定しているのは、礁嶺や水路、陸地の存在や海岸 線の形状といった裾礁を構成する10<sup>2</sup> ~ 10<sup>3</sup> mの 地形である。言い換えれば、海水が外洋から入り 込む'器'の形状によって運動パターンが決まっ ている。そして、地形がコントロールする海水運 動パターンは、1次オーダーの海水運動だと考え ることができる。それは、'器'としての地形が 変わらなければ、変化しないパターンである。前 述したように、台風や暴浪による攪乱後に礁原上 の微地形配列が回復する。それは、海水運動パ ターンを決定している10<sup>2</sup> ~ 10<sup>3</sup> mの地形が、数 回程度の台風や暴浪の来襲では基本的に変化しな いためである。このような地形の形成と変化は、 10<sup>2</sup>年以上の長いタイムスケールで起こるもので



図 12 1991 年撮影の空中写真(撮影:国土地理院).



## ある。

現実のサンゴ礁ではそれに加えて、台風や潮汐 による流れの変化が生じる。それは1次オーダー の海水運動より短いタイムスケールの現象であ り、2次オーダーの海水運動と考えることができ る。1次オーダーの海水運動は2次オーダーの積 分でもある。

## V.自然地理的ユニットの設定: もうひとつの空間構造

## 1)海水運動パターンに見られる空間構造

上記した与論島北東部礁原での海水運動パターン(図9)は、隣接する地域と区別されるひとつの系として捉えることができる。さらに、図11を見ると、与論島の東部サンゴ礁では4つの系が認められる。ひとつの系の中で、海水は、外洋

から礁嶺を越え, 礁池に入って海岸線に平行に流 れ, ある定まった地点で, 再び外洋に出るという 一連の動きをする。それぞれの系の境界では, 海 水運動の方向が逆になっている。与論島東部のサ ンゴ礁では, 賀義野沖, 大金久沖, 赤崎沖に境界 が認められる。賀義野沖と赤崎沖では, 陸上の分 水嶺のように, 外洋から入ってきた海水が2つ の方向に分かれて動く。赤崎沖では, 異なる方向 から動いてきた海水がぶつかり, 同じ方向の流れ になって, 外洋に出て行く。

このような海水運動パターンは、陸上の水系に 類似する。ただし、陸上の水系で水は分水嶺で完 全に別の方向に流れるが、このサンゴ礁の礁原で の系では、境界も海水が連続しており、完全には 分離しない。状況によっては、隣接する系間で、 ある程度の量の海水が行き来する可能性もある。 したがって陸上の水系は閉鎖系であるが,サンゴ 礁のこの系は半閉鎖系である。

以上のように,海水運動パターンは空間的な系 を示す。裾礁の礁原上では帯状構造という空間構 造が認められるが,それに加えて地形が要因と なって決められる海水運動パターンが示す空間構 造が認められる。

#### 2) 裾礁の礁原上での自然地理的ユニット

Manson (1950) は、サンゴ礁地域ではないア メリカ合衆国本土の海岸を例としながら、砂浜の 安定と回復について論じている。その中で、海岸 の現象を研究するための基本的な概念のひとつに '自然地理的ユニット(Physiographic unit)'を あげている。彼はそれを以下のように定義してい 3. 'This unit may be defined as a shore area so limited that the shore phenomena within the area are not affected by the physical conditions in adjacent area (このユニットは、隣接地域の 物理的コンディションに影響を受けないように限 られた海岸地域として定義される)。堀越 (1979a, b)や Horikoshi (1982)は、石垣島川 平湾やパラオにおいて、湾入部の波浪環境に着目 し、空間構造を研究している。そこでは、2つの 岬と岬間の湾入部で構成される湾という地形が, 空間的に隣接する地域を区別されるユニットを構 成していることから、Manson(1950)を引用し て'自然地理的ユニット'とした。そして、'無 機環境系の構造と機能に関わる基本的な問題とし て,諸現象が生起する場の地学的な形態的特徴, つまり海洋生態系ならば、海水を満たしている '器'の形をまず最初に考えねばならない'と述 べている(堀越,1979b)。 '器'とはすなわち地 形である。

本研究が示した裾礁の礁原上の系は地形が作っ た半閉鎖的な空間構造であり,自然地理的ユニッ トと考えることができる。裾礁の礁原上で認めら れた自然地理的ユニットは,地形によって境され るが,海水とそれが運搬する堆積物や栄養塩など の物質の移動する系である。それは隣接する他の ユニットとは区別される半閉鎖的な基本単位であ る。 陸域における水系は、水と水が運搬する物質の 移動系である。水系は、陸上の自然を把握すると きに基本となる空間単位である。それに対して、 海域の場合は海水で連続しており、基本的には開 放系であるため、そのような閉鎖系の空間単位を 設定しにくい。しかし、本研究は、裾礁の礁原で は、海水とそれが運搬する物質移動系の空間的基 本単位として自然地理的ユニットが設定できるこ とを示した。

本研究では,自然地理的ユニットを以下のよう に定義する。

(1) 地形的な境界により、隣接する他地域と 区分されるユニット

(2)同時に、物質移動系で、隣接する他地域 と区分されるユニット

以上のような考えに基づき,与論島北東部サン ゴ礁では,4つの自然地理的ユニットが設定された(図13)。

自然地理的ユニットは、帯状構造とともに、サンゴ礁の空間構造を把握する上で基本的な視点となるべきである。図14には、与論島の礁原上での空間構造を模式的に示した。すなわち、帯状構造と自然地理的ユニットとを重ねて示した。この結果、微地形や生物の分布と海水運動との関係を考察することが可能となる。

ところで、図13には、縁脚 縁溝系の配列方 向が示された。波の作用が縁脚 縁溝系の配列方 向を決定していることは、Munk and Sargent (1954)の記載的研究や Roberts (1974)の定量 的研究で明らかになっている。すなわち縁脚 縁 溝系の配列方向は、外洋からの波の卓越入射角に 一致する。したがって図13に示した縁脚 縁溝 系の配列方向は、波の卓越入射方向である。与論 島東部では、すべての場所で、波の卓越入射方向 は、礁縁にほぼ直交している。このことは、礁池 内の海水運動の向きが、波の入射方向とは無関係 であり、基本的に地形によって決まっていること を裏付けている。

# 3)サンゴ礁生態系の中での自然地理的ユニットの意味

現実の地域生態系は、食物連鎖や競争などの種





Fig. 13 Physiographic unit(PGU) map of the east coral reef of Yoron Island. 1: Reef Edge, 2: Dominant Direction of Spur and Groove System, 3: Boundary between Physiographic Units, 4: Physiographic Units.





Fig. 14 Typical spatial structure on reef flat of Yoron Island : Physiographic unit and zonation.

間関係といった生物学的関係(生物群集系)と, 無機物や海水運動そして地形などが関わる無機的 関係(無機環境系),さらに生物群集系と無機環 境系との間の関係から成り立っている(堀越, 1979b)。本研究でいう自然地理的ユニットは, その中の無機環境系を表現した空間構造である。 しかも特に海水の動きに着目したものである。こ の節では、サンゴ礁の地域生態系における、海水 の動きの重要性と、海水の動きに着目して設定さ れた自然地理的ユニットの意味について述べる。

サンゴの生育条件やサンゴ礁の成立条件については、これまで多くの研究がなされ、整理されてきた(Stoddart, 1969; 堀, 1980b; Hubbard, 1997)。図15は、これらの研究に基づき、海水の動きを



Italics are processes.

図 15 サンゴ礁生態系における海水運動 地形 堆積物 生物間 の関係.

Fig. 15 Relations among seawater movement, landforms, sediments, and organisms in coral reef ecosystem.

中心に据え、それらと地形、堆積物、そして生物 との関係をまとめたものである。海水の動きは、 直接的な応力として、サンゴの生活形の変化、サ ンゴなどの造礁生物の破壊による堆積物生産、あ るいは地形形成に影響する。また、海水の動き は、物質を運搬する機能を持っている。この物質 とは、海水と堆積物である。堆積物はその堆積と その動きによる侵食とで、地形形成に寄与する。 また海水は、熱(水温)、栄養塩、酸素、塩分、 生物の卵や幼生を含む生物、さまざまな微粒子を 持つ。そしてそれは、生物の成長と非常に大きな 関係がある。なお、地形は、海水の動きをコント ロールすると共に、生物の生息空間を提供する。

このように海水の動きは、サンゴ礁の無機環境 系の中で中心的な役割を果たすと共に、生物群集 系にも多大な影響を与えている。すなわち海水の 動きは、サンゴ礁生態系において、生物的系と無 機的系の関係を把握するための大変重要な鍵を 握っている。

したがって、海水の動きから設定された自然地 理的ユニットは、無機環境系の空間構造でありな がらも、生物群集系を含めた生態系全体を表現す る空間構造だといえる。さらに、自然地理的ユ ニットを基本とし、それに生物分布や生物間のさ まざまな関係性を重ね合わせることによって、生 態系全体の空間構造を把握することが可能であ る。それは、より生態学的なユニットとなる。

#### VI.まとめ

与論島北東部のサンゴ礁地形の空中写真判読と 地形・堆積物調査から、以下のようなことが明ら かとなった。 (1) 礁原上の空中写真にあらわれる線状パター ンは微地形の配列であり、それは、堆積物の移動 パターンであり、さらに海水運動パターンであ る。

(2)この海水運動は、海水が外洋から礁嶺を越 えて礁池に入り、そして海岸線に平行に流れた後 に、礁嶺の切れ目あるいは水路から外洋に出て行 くというパターンを示す。

(3)この一連の海水運動は、陸上の水系での水 の動きに類似するひとつの系であり、与論島北東 部サンゴ礁では、4つの系が設定できた。

(4)系を形づくるのは礁嶺,水路,陸地の存在 と形状(岬)などの地形である。

(5) このような地形がコントロールする海水運 動は、より長いタイムスケールの中での卓越的な 運動である。

(6)このような系,すなわち空間構造を「自然 地理的ユニット」と呼ぶことを提案する。

(7)本研究で明らかになった礁原上の自然地理 的ユニットと、これまでの研究で知られている帯 状構造とを重ね合わせることによって、10<sup>1</sup>~ 10<sup>3</sup> m スケールのサンゴ礁の空間構造が明らかに なる。

近年、サンゴ礁の保全の必要が高まっている が、保全のためのツールには、具体的な地域のサ ンゴ礁生熊系の把握が求められるものが多い。サ ンゴ礁裾礁上に設定される自然地理的ユニット は、地形がコントロールする海水運動パターンか ら把握できる空間構造である。一方、サンゴ礁上 の生物群集は、海水の動きやそれによって左右さ れる水質と密接な関係を持つ。したがって自然地 理的ユニットは、地域のサンゴ礁生態系の中で, 土台となる空間的骨組みである。そこで、自然地 理的ユニットを応用した環境影響評価や海域保護 区の設定が有効だと考える。筆者は、1980年代 末の石垣島・白保サンゴ礁上での空港建設計画に 関わる環境影響評価手続きの際に、サンゴ礁生態 系の把握と影響評価において自然地理的ユニット の応用が有効であることを提言した(中井, 1998)。また、沖縄島・辺野古サンゴ礁での基地 建設の環境影響についても、自然地理的ユニット

を用いた評価を試みた(中井,2004)。さらに白 保サンゴ礁については、自然地理的ユニットを応 用して海域保護区の空間デザイン(ゾーニング) を提示した(中井,2007)。今後さらに具体的な 事例でその可能性を検討したい。

本研究は裾礁である与論島を対象とした。サン ゴ礁地形のタイプにはそれ以外に堡礁や環礁など があるが、世界のサンゴ礁の分布から見て、裾礁 は数多くかつ非常に広い範囲に分布する(堀、 1980a)。さらにサンゴ礁の自然環境保全を考え た場合、深くかつ幅の広いラグーンを持たない裾 礁は、隣接する主島にすむ人間の活動の影響を強 く受ける。したがって裾礁の空間構造を明らかに し、自然環境保全のために基礎的な情報と考えを 提示することは、人とサンゴ礁との共存を考える 上で非常に重要である。今後、与論島で示した事 例を発展させ、他の裾礁、あるいは堡礁や環礁に おける自然地理的ユニットの設定ついての検討も 必要であろう。

### 謝辞

筆者をサンゴ礁研究に導き、フィールドを含むさま ざまなところでの議論や、数々のご助言と励ましをい ただいた堀 信行先生(首都大学東京名誉教授)に心 から感謝します。また、故沼田 眞先生(千葉大名誉 教授・元(財)日本自然保護協会会長) 横山隆一氏 ((財)日本自然保護協会常務理事)には、筆者の地形 学的・自然地理学的なサンゴ礁研究を自然環境保全の 側面から問い直すきっかけを作っていただいた。また、 サンゴ礁の自然環境保全の議論に際し、故堀越増興先 生(東京大学名誉教授)にはさまざまなご助言をいた だいた。筆者の与論島調査では、東京都立大学や広島 大学の多くの学生諸氏の協力を得た。そして川畑辰興 氏,原田吉村氏,本 俊一氏をはじめ多くの与論島民 の方々には、1977年の初調査以来、調査のたびに数々 のご協力いただいた。これらの多くの方々に感謝しま す。

#### 注

- 1)図9および図11中で、海水運動の方向は、L-3で の堆積物調査結果と、塊状サンゴあるいはサンゴ塊 とその下流側に形成されるマウンドとの位置関係か ら判断した。
- 2) 礁嶺や水路などの地形は、サンゴ礁によって発達

の程度が異なる。これらの地形の発達の程度の違い は海水運動パターンの性質,ひいては海水運動パ ターンによって設定される個々の自然地理的ユニッ トの性質に影響する。

#### 文 献

- 秋山吉則(1979): 漂砂の指標としての「星砂」の砕屑 過程 与論島北東部現成サンゴ礁を例として.地理 科学,31,33 40.
- Barnes, J., Bellamy, D.J., Jones, D.J., Whitton, B.A., Drew, E.A., Keyon, L., Lythgoe, J.N. and Rozen, B.R. (1971) Morphology and ecology of reef front of Aldabra. Symp. Zool. Soc. Lond., 28, 87 114.
- Dollar, S.J. and Tribble, G.W. (1993) Recurrent storm disturbance and recovery: A long-term study of coral communities in Hawaii. *Coral Reefs*, 12, 223 233.
- Geister, J. (1977) The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbiean coral reefs. *Proc. 3rd Coral Reef Symp.*, 1, 23–29.
- Goreau, T.F. (1959) The ecology of Jamaican coral reefs, 1. Species composition and zonation. *Ecology*, 40, 67–90.
- Graus, R.R. and Macintyre, I.G. (1989). The zonation patterns of Caribbean coral reefs as controlled by wave and light energy input, bathymetric setting and reef morphology; Computer simulation experiments. *Coral Reefs*, **8**, 9–18.
- Hirata, K. (1956) Ecological studies on the recent and raised coral reefs in Yoron Island. Sci. Rep. Kagoshima Univ., 5, 97 118.
- Hirata, K. (1958) Ecological studies on the recent and raised coral reefs in Yoron Island. Sci. Rep. Kagoshima Univ., 7, 69–94.
- 平田国雄・大迫暢光・堤 民人(1971) 与論島の珊瑚 礁.ベントス研連誌,21 30.
- Hopley, D. (1982). *The Geomorphology of the Great Barrier Reef.* Wiley-Interscience, New York.
- 堀 信行(1980a) 日本のサンゴ礁.科学, 50, 111 122.
- 堀 信行(1980b)第四紀のサンゴ礁地形形成海域の地 理区分.西村嘉助先生退官記念事業実行委員会編: 西村嘉助先生退官記念地理学論文集,170174.
- 堀川清司(1973) 海岸工学.東京大学出版会.
- 堀越増興(1979a):熱帯性海域の沿岸生態系 地域生態 系における自然地理的ユニットのモデルとしての石 垣島・川平湾.堀部純男編:環境科学としての海洋 科学,3,145 157.
- 堀越増興(1979b)、ベントスの指標性と地域生態系.堀 部純男編:環境科学としての海洋科学、3,284 297.
- Horikoshi, M. (1982) Kabira Cove: Interdisciplinary study of a physiographic unit in tropical coastal waters of Japan. Proc. 4th Int. Coral Reef Symp., 1, 699 706.
- Hubbard, D.K. (1997) Reefs as dynamic systems. in Life and Death of Coral Reefs edited by Birkeland, C., Chapman & Hall, 43 67.

- 岩田好一朗・水谷法美・青木伸一・村上和男・関口秀 夫(2005):海岸環境工学.朝倉書店.
- 栗山善昭(2005) 砂浜砕波帯における流れと地形変化. ながれ,24,4755.
- Ladd, H.S. (1950) Recent reefs. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **34**, 203–214.
- Manson, M.A. (1950): Geology in shore-control problems. in *Applied Sedimentation* edited by Trask, D.K., John Willey, 276 290.
- 目崎茂和・渡久地健・中村倫子(1977):沖縄島のサン ゴ礁地形.琉球列島の地質学研究,2,91 106.
- Munk, W.H. and Sargent, M.C. (1954) Adjustment of Bikini Atoll to ocean wave. U.S. Geological Survey Professional Paper, 260 C, 275 280.
- Nadaoka, K., Nihei, Y., Kumano, R., Yokobori, T., Omija, T. and Wakaki, K. (2001) A field observation on hydrodynamic and thermal environments of a fringing reef at Ishigaki Island under typhoon and normal atmospheric conditions. *Coral Reefs*, 20, 387 398.
- 中井達郎(1998)サンゴ礁の自然保護. 沼田 眞編: 自然保護ハンドブック,朝倉書店,544556.
- 中井達郎(2004) 空中写真判読による生態系の空間構 造の把握 辺野古サンゴ礁,白保サンゴ礁等を例 に .日本サンゴ礁学会第7回大会要旨集,47.
- 中井達郎(2007)サンゴ礁海域保護区の設定における 自然地理的ユニットの応用 石垣島・白保サンゴ礁 を例に .日本地理学会学会発表予稿集,71,180.
- Nakamori, T. (1986). Community structures of Recent and Pleistocene hermatypic corals in the Ryukyu Islands, Japan. Sci. Rep. Tohoku Univ., 2nd Ser. (Geol.), 56, 71 133.
- 中村 充(1979):水産土木学.工業時事通信社.
- Roberts, H.H. (1974) Variability of reefs with regard to changes in wave power around an island. Proc. 2nd Int. Coral Reef Symp., 2, 497–512.
- Rozen, B.R. (1971) The distribution of reef coral genera in the Indian Ocean. Symp. Zool. Soc. Lond., 28, 263 299.
- Shinn, E. (1963) Spur and groove formation on the Florida Reef Tract. J. Sediment. Petrol., 33, 291 303.
- Stoddart, D.R. (1969) Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biol. Rev.*, **44**, 433–498.
- Stoddart, D.R. (1973) Coral reefs of the Indian Ocean. in *Biology and Geology of Coral Reefs* edited by Jones, O.A. and Endean, R., 1-Geology, Academic Press, 51 92.
- Suhayda, J.N. and Roberts, H.H. (1977) Wave action and sediment transport on fringing reef. Proc. 3rd Coral Reef Symp. 2, 65 71.
- Tait, R.J. (1972) Water-set-up on coral reefs. J. Geophys. Res., 27, 2207 2212.
- Takahashi, T. and Koba, M. (1977) Emerged Holocene coral reefs around Kume Island, Ryukyus. Sci. Rep. Tohoku Univ., 7th Ser. (Geogr.), 25, 189 196.
- Takahashi, T. and Koba, M. (1978). A preliminary in-

vestigation of the coral reefs at the southern coast of Ishigaki Island, Ryukyus. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, *7th Ser. (Geogr.)*, **27**, 149–162.

- Takahashi, T., Koba, M. and Nakamori, T. (1985). Coral reefs of Ryukyu Islands: Reef morphology and reef zonation. Proc. 5th Int. Coral Reef Symp., 3, 211 216.
- Wells, J.W. (1957) Coral reefs. Mem. Geol. Soc. Am., 67, 609–631.
- Yamano, H., Kayanne, H., Yonekura, N., Nakamura, H. and Kudo K. (1998) Water circulation in a fringing reef located in a monsoon area: Kabira Reef, Ish-

igaki Island, Southwest Japan. Coral Reefs, 17, 89 99.

- Yamazato, K. (1959) Ecological studies on the coral reefs Kume Island, I. Distribution of coral reefs. Bull. Arts Sci. Ryukyu Univ., Math. Nat. Sci., 3, 53 64.
- Yoshida, M., Hanaizumi, H. and Yamano, H. (2006). A method for extracting flow lines in coral reef field using aerial photographs. Proc. 10th Int. Coral Reef Symp, 1746–1752.

(2007年1月15日受付,2007年5月28日受理)