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

* 国士舘大学
* 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 10^1 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、 $10^1 \sim 10^3$ 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。

$10^1 \sim 10^3$ 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 $10^1 \sim 10^3$ 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、 $10^1 \sim 10^3$ 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。

①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。

②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、10m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

図 1 与論島の位置と概要。
線は、図 2 の測線。

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、縦断面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 (Mdφ) に合わせ、0 φ (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 27°2'N, 128°26'E 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 1 km を越える。北部～東部～南東部にかけての礁原上には最大 3 ~ 4 m 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.

で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 1 m 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

に带状区分される。

①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。

②サンゴ・マウンド帯：未固結の堆積物が作る

図 3 サンゴ塊の一例 (測線 L-3, no.56 付近).

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

図 4 サンゴ・マウンドの一例 (測線 L-3, no.25 付近).

矢印は海浜流の卓越流向。

Fig. 4 An example of a coral mound (At no.25 on transect L-3).

Arrows show dominant current directions.

池内に、ハ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

図 5 与論島東部でのサンゴ礁の帯状構造。
1: 礁縁, 2: 礁嶺, 3: サンゴ塊帯, 4: サンゴ・マウンド帯。

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搬方法であったのに対し，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碎波するが，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

図 7 黒花沖 (L-3) での堆積物の分布と挙動.
Fig. 7 Sediment movement on L-3 offing Kurohana.

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。

一般に、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。もっとも大きな碎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、碎波し始め、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。

一方、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: ブ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。

凡例 B

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.

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.

図 8 礁原上の海水運動モデル。

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。

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.

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¹⁾。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

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).

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					

◎：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

(気象庁、台風経路データにより作成)

く。

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擦することに着目し、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 40 km 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

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かず、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 10-12 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

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 $10^2 \sim 10^3$ 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 $10^2 \sim 10^3$ 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、 10^2 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）。

Fig. 12 Aerial photo of coral reef taken in 1991.
The aerial photos were taken by Geographical Survey Institute.

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る。‘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)。¹⁾ ‘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

図 13 与論島東部サンゴ礁における自然地理的ユニット。
 1: 礁縁, 2: 縁脚-縁溝系の配列卓越方向, 3: 自然地理的ユニットの境界,
 4: 自然地理的ユニット。
 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.

図 14 与論島礁原での空間構造：自然地理的ユニットと帯状構造。
 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、 $10^1 \sim 10^3$ 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態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に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」の碎屑過程—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 Caribbean 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, 170-174.
- 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.
- 岩田好一郎・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): 砂浜碎波帯における流れと地形変化。ながれ, **24**, 47-55.
- 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 Wiley, 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., Omiya, 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, 544-556.
- 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, Ishigaki 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)