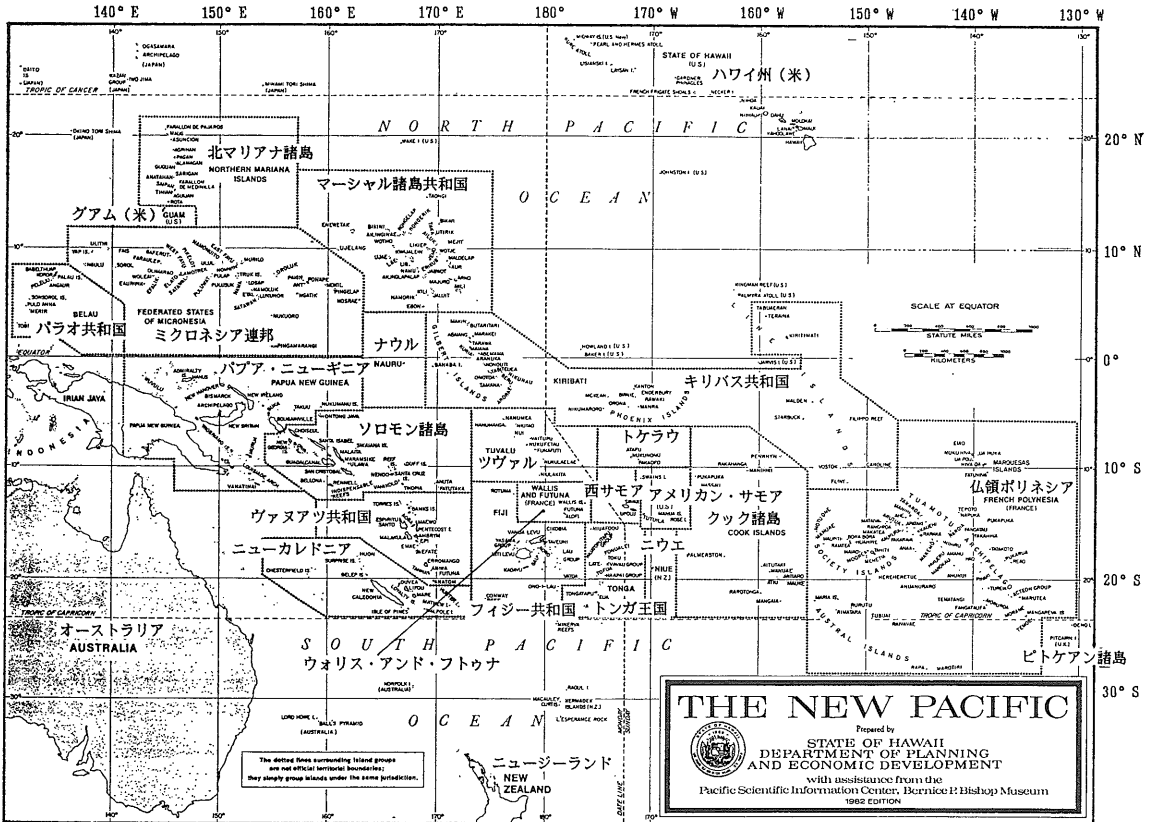


地球温暖化とサンゴ礁

茅根 創¹⁾



第1図 太平洋諸島（ハワイ州経済開発企画省作成の地図より）

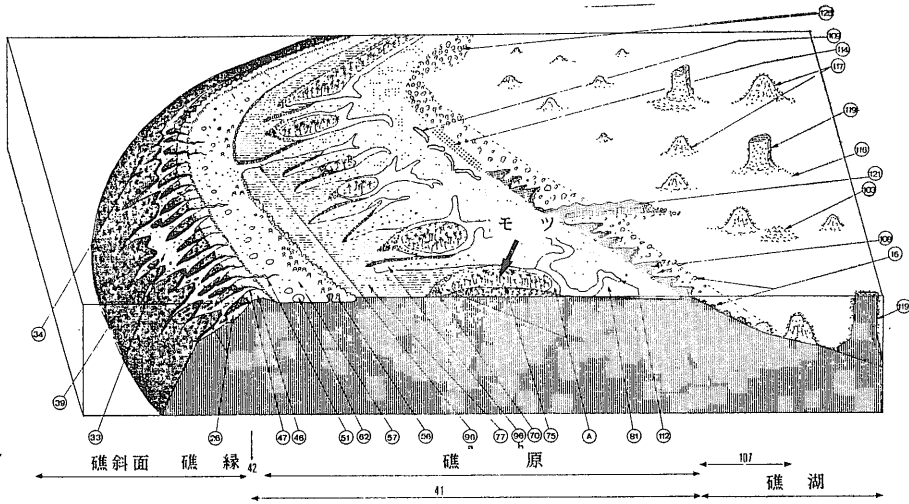
1. はじめに

地球温暖化防止のために、二酸化炭素の排出削減などからなる気候変動枠組条約交渉が、1992年6月ブラジルで開かれる国連環境開発会議での合意に向け活発化している。温暖化の予測には不確実性が残るとして二酸化炭素の削減目標設定に反対しているアメリカなどに対し、強い対策を求めているのは、温暖化による海面上昇によって国土が水没してしまう危機をもつ太平洋などのサン

ゴ礁の国々である。サンゴ礁と地球温暖化との関係は、このように温暖化の影響を真っ先に受けるということばかりではない。サンゴ礁段丘やサンゴ群体の年輪は過去の環境変動の記録を豊富にもっている。こうした記録の解析によって過去の環境変動のメカニズムが解明され、将来の環境変動の予測にも役立つことが期待されている。さらに、サンゴ礁における膨大な有機物の生産と炭酸カルシウム骨格の形成は、二酸化炭素を固定するエコファクトリーとして注目されている。

1) 地質調査所 海洋地質部
 1991年9月号

キーワード：サンゴ礁，地球温暖化問題，海面上昇



第2図 環礁のブロック
ダイアグラム
(Battistini et
al., 1975)

本稿では、地球温暖化とサンゴ礁との関係について、海面上昇による影響予測とサンゴ礁における CO₂ 固定能力を活用した対策技術開発について概説する。サンゴ礁による過去の環境変動の解析については、本特集において米倉 (1991) がサンゴ礁段丘と海面変化との関係を、松本 (1991) がサンゴ年輪の解析による環境変動メカニズムの解析について述べているので、本稿ではふれない。

2. 水没する島々

2.1 太平洋のサンゴ礁の国々

21世紀は太平洋の世紀と言われて久しいが、この言葉で示される太平洋とは、アメリカ、日本、オーストラリア、東南アジアなどの太平洋周縁諸国である。太平洋に散らばる島々については、その国名さえ定かでない人が多いのではないだろうか。北回帰線と南回帰線の間の中中部太平洋には、9つの独立国（ナウル共和国、キリバス共和国、パプア・ニューギニア、ソロモン諸島、ヴァヌアツ共和国、フィジー共和国、西サモア、トンガ王国、ツバル）と4つの自由連合（ミクロネシア連邦、マーシャル諸島共和国、ニウエ、クック諸島）、アメリカの自治領である北マリアナ諸島、アメリカの50番目の州であるハワイ州、アメリカ領のグアム、アメリカンサモア、フランス領のポリネシア、ニューカレドニア、ウォリス・アンド・フトゥナ、チリ領イースター諸島、ニュージーランド領トケラウ、イギリス領ピトケアン諸島がある（第1図）。パラオ諸島については自由連合承認のための住民投票で賛成が得られず、政治的には国連信託統治領のままである。これらの国々のすべてがサンゴ礁をもつ島々からなる。サ

ンゴ礁は、火山島や隆起サンゴ礁、島弧を直接縁どる裾礁、島から礁湖を隔てて沖合いにサンゴ礁が取り囲む堡礁、サンゴ礁だけがリング状に続く環礁に分けることができる（茅根, 1990）。このうち、温暖化による海面上昇の影響を最も強く受けるのは、高い島をもたない環礁である。トケラウのすべての島々と、マーシャル諸島共和国、ツバル、キリバス共和国、ミクロネシア連邦、フランス領ポリネシアのほとんどの島々が環礁からなり、クック諸島など他の国々も多く環礁をもっている。インド洋でも、モルジブ共和国は環礁ばかりで構成されている。

環礁を構成する島々は多くの場合、標高数 m 以下で、最大の標高が 1~2 m という島も多い。第2図に環礁のブロックダイアグラム、写真1に空中写真を示す。平坦な礁原上にやしの木でおおわれた島が続くのが判る。こうした島をモツ (motu) または州島 (sand cays) などと



写真1 ミクロネシアの環礁の空中写真

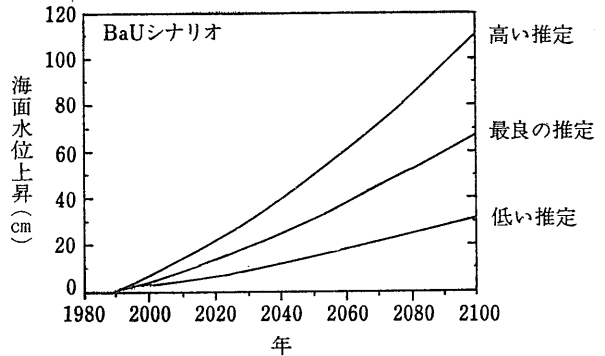
呼ぶ。礁原は主にサンゴによって作られ、その高度は低潮位以下である。モツは、更新統の石灰岩によって作られている場合と、海側から礁原上に打ち上げられたサンゴなどの砂礫によって作られている場合とがある。環礁における人々の居住・生活の場はこのモツである。モツは、海面すれすれに顔を出すだけの島であるから、これまでも台風や高潮による被害を度々受けてきた。1 mの海面上昇が起これば、こうした被害がより一層深刻になり、さらには多くの環礁が消滅してしまうことが警告されている。

2.2 予測される海面上昇

それでは、地球温暖化に伴う海面上昇は実際にはどの程度と推定されているのだろうか。海面上昇の予測値は、前提となる気候モデルに不確かな部分が残っていることもあって研究者によって異なっており、2100年までに0.5～3 mの範囲でばらついている。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第1作業部会（気候変動の科学的評価）報告によれば、温室効果ガス排出の対策を講じなかった場合、気温は2025年までに1℃、2100年までに3℃上昇する。これによる海水の熱膨張と陸氷の部分的融解によって来世紀の海面上昇速度は6 mm/年になり、海面は2025年には25 cm、2100年には65 cm、最大1 m現在より高くなることが予測されている（第3図：Houghton et al., 1990；要約の訳が霞が関地球温暖化問題研究会, 1991によって出版されている）。本論では比較的控えめな値としてこの予測値を用いて、海面上昇とサンゴ礁との関係について議論する。

2.3 海面上昇とサンゴ礁の成長

こうした海面上昇にサンゴ礁はどのように反応するであろうか。実は、サンゴ礁は、すでに数1000年前に急激な海面上昇を経験しているのである。1万8千年前は最終氷期の最寒期で、北米と北西ヨーロッパにも氷床が発達していた。大量の海水が氷床に固定されたために海水量が減り、海面は今より80 mも低かった。1万5千年前から、気温が上昇するにつれて北半球の氷床はとけ始め、6千年前にはほとんどとけてしまった。これに伴って海面は急激に上昇した。その速度は10 mm/年以上に達し、温暖化によって予測される来世紀の海面の上昇速度を上回っている。6千年前に降海面はほぼ安定したが、氷と海水の荷重分布の変化によって地球が変形したため、海面変化曲線は地域的に多少異なったものになっている。現在地形としてみられるサンゴ礁は、この後氷期の海面上昇とその後の安定に、サンゴ礁の上方への成長が追いついて作られた。サンゴ礁の成長過程は、現在のサンゴ礁のボーリング調査を行ない、その内部構造と形成年代を明らかにすることによって知ることができ



第3図 温室効果ガスの排出規制を講じなかった場合に予測される海面上昇

る。こうした調査によって、サンゴ礁の成長と海面上昇との関係は以下の3類型に区分することが提案されている（Neumann and Macintyre, 1985）。Keep-up型：サンゴ礁の頂面が常に海面の上昇に追いついてきたもの。Catch-up型：海面上昇に遅れてサンゴ礁の頂面が海面に達したもの。Give-up型：サンゴ礁の頂面が海面上昇に追いつけず、発達を止めたもの。また、Davies and Hopley (1983)によれば、オーストラリアのグレートバリアリーフのサンゴ礁の上方成長速度は1—18 m/1000年（1—18 mm/年）の範囲である。すなわち、来世紀に6 mm/年の速度で海面が上昇しても、サンゴ礁の成長がこれに“Keep-up”して行けば、サンゴ礁は水没しないで残るであろう。それでは、どんな条件でサンゴ礁は海面上昇に追いつくことができ、どんな条件で追いつけないのだろうか。6 mm/年の海面上昇にサンゴ礁は追いつくことができるだろうか。それは、サンゴ礁形成の場によるのである。

第4図と第1表に、Kayanne et al. (投稿中)、米倉編 (1986) などにもとづいて作成したマリアナ諸島と琉球列島の裾礁における地形・層相（構成物の特徴によって分けた内部構造の単位）区分を示す。この区分は裾礁のものであるが、環礁でも、モツの海側の礁原は同じ地形・層相構成になっている。サンゴ礁の地形はこのように明瞭な分帯構成をもつが、それぞれの地形分帯が特徴ある層相によって構成されている。各層相はそれぞれ固有の上方成長速度をもっている。後氷期の海面上昇期には、塊状サンゴと未固結のサンゴ・石灰藻などの生物遺骸片とからなる礁台が、水深3 m以深で最大16 m/1000年の速度で上方に成長してバンク状の高まりを作った。礁台は水深3 m以深の低エネルギーの場に形成される層相であるため、サンゴ礁頂面は海面に追いつくことができなかった。水深3 m以浅のきわめて波の力の強い場で形成され

る層相は礁嶺か石灰藻嶺で、その上方成長速度は、それぞれ、1.0—3.2m/1000年、0.5—1.2m/1000年と遅い。世界の他のサンゴ礁掘削結果でも、礁嶺の上方成長速度は1—4 m/1000年の間である。すなわち、サンゴ礁の頂面は海面の上昇速度が4 m/1000年（4 mm/年）以下になって初めて海面に追いつくことができた。以上の結果から、極浅海で作られるサンゴ礁の枠組部分である礁嶺や石灰藻嶺は、6 mm/年の海面上昇に追いつけないことになる。このため、その背後のモツや裾礁・堡礁の海岸は外洋の波に直接さらされることになり、海岸浸食や水没のおそれが出てくる。

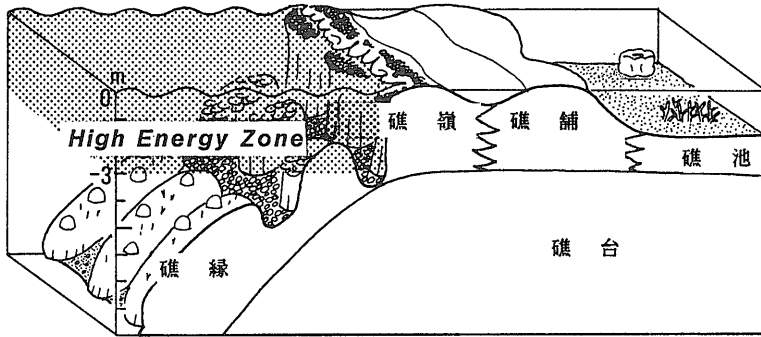
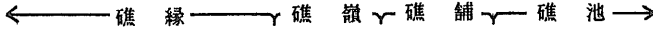
海側から打ち上げられた石灰砂礫からなるモツについては、暴浪の時などにエピソディックに成長するらしい

と言われている。台風の後には厚さ1 mの堆積があったことも知られているが、成長の一般的なメカニズムはまだ判っていない。

2.4 マングローブ林の水没とその影響

堡礁や裾礁では、サンゴ礁の内側の島を縁どる海岸線に、広大なマングローブ林が広がっている。マングローブ林は、固有の動植物群集からなる生態系で、サンゴ礁と同様高い一次生産をもつため、熱帯の人々の生活と生産の場になっている。マングローブ林は潮間帯に成立している生態系であるから、サンゴ礁同様温暖化に伴う海面上昇の影響を受ける。Matsumoto et al. (1986) は、ミクロネシアのトラック島とポナペ島のマングローブ林の堆積物を調査し、6000年前以降、トラック島において0.3m/1000年、ポナペ島において0.6m/1000年の速度で上方に堆積したことを明らかにした。Miyagi and Fujimoto (1989) も両島のマングローブ林堆積物の調査から、2000年前以降の海面の2 mの上昇に伴って、1.5m/1000年以下の堆積速度でマングローブ林が成立したとしている。このように、マングローブ林の上方堆積速度は1.5 m/1000年（1.5mm/年）以下ときわめて小さく、6 mm/年の海面上昇で沈水してしまう可能性が高い。マングローブ生態系の破壊は、動植物群集の死滅や生産基盤の消失、海岸浸食を招くばかりではない。マングローブ林は陸域か

Geomorphic unit



Facies

第4図 マリアナ諸島・琉球列島の裾礁の地形・層相区分

第1表 裾礁の地形・層相区分とその特徴

地形・層相区分	位置	構成物	形成深度	上方成長速度 (m/1000年)
礁嶺 (reef crest)	サンゴ礁海側の 高まり	ミドリイン類、石灰藻、 固結した生物遺骸片	低潮位～4 m	1.0—3.2
礁舗 (reef pavement)	礁嶺陸側の高まり	サンゴ礫	低潮位～4 m	1.1
礁台 (reef platform)	礁嶺下位のバンク 状の高まり	塊状サンゴ 石灰砂礫	—3 m以深	4.8—16
礁縁 (reef front)	礁嶺海側の緩斜面	塊状サンゴ	—3 m以深	0.8—3.1
石灰藻嶺 (algal ridge)	サンゴ礁海側の 高まり	石灰藻	潮間帯～2 m	0.5—1.2

らの物質のトラップとしての機能もあり、これが失われるとサンゴ礁は直接陸域の圧力を受けることになる。さらに、マングローブ林が破壊されれば、膨大なバイオマスや堆積物(マングローブ泥炭)中に有機物として蓄えられたCO₂が大気中に放出され、温暖化を促進する可能性もある。

2.5 サンゴ礁における海面上昇の影響と対策

サンゴ礁の極浅海域で作られる礁嶺や石灰藻嶺の上方成長速度は4 mm/年以下で、温暖化に伴う海面上昇が6 mm/年であった場合、成長はこれに追いつけずサンゴ礁は沈水する。温室効果ガス排出規制、吸収源の拡大によって海面上昇を4 mm/年以下に抑えなければならぬ。また礁嶺の成長を促して成長速度をその上限に高め、生態工学的に島の沈水を防ぐ研究を始める必要がある。モツの成長過程については知見に乏しく、その形成メカニズムを明らかにした上で、形成を促す対策を立てる必要がある。マングローブ林については、その堆積速度が1.5mm/年以下と小さく沈水の可能性が高い。マングローブ林の沈水・破壊が温暖化に正のフィードバックをもたらす可能性もあり、十分な対策が必要である。

3. サンゴ礁による二酸化炭素の固定

3.1 サンゴ礁におけるCO₂固定能力

サンゴ礁においては、サンゴ体内の共生藻による有機物の生産と炭酸カルシウム骨格の形成とを通じて、活発にCO₂の固定が行なわれている(茅根, 1990)。確かに、海洋において無機化学的に炭酸カルシウムだけを沈澱させれば炭酸系の平衡によってCO₂は放出される(角皆, 1989)。しかし、サンゴ礁では、明らかに生物学的に、光合成と共役した形で炭酸カルシウム骨格が形成されており、無機化学的な平衡系だけからの議論には問題がある。最近では、サンゴ礁における高い一次生産に着目し、「(二酸化炭素による地球温暖化問題に対して)基礎生産力が高く、炭酸カルシウムを形成するサンゴ礁は、重点調査海域の1つに挙げられる」(本多, 1990)といった意見や「さんご礁の物質収支を解明しようとする研究がCO₂固定化研究として開始されているが、もちろんこれらの研究がさんご礁の生成すなわち大気中のCO₂減少と単純化して考えているわけではない。さんご礁の場での生物による有機物生産(炭酸同化作用)に大きく期待しているというべきである」(大隅, 1991)といった評価もあがっている。サンゴ礁における二酸化炭素の固定は、工業的固定とならんで生物的固定の重要な技術の1つとして位置づけられている(平井, 1991)。通産省の「地球再生計画」においても、中・長期的課題としてCO₂吸収源

の拡大がとりあげられている。自然のメカニズムに逆らわず、自然の吸収源としてサンゴ礁を活用することは、同計画の「人と自然にやさしい科学技術」の具体化でもある。

我々の琉球列島における調査でも、炭酸カルシウムとともに過剰な有機物が生産されており、サンゴ礁海域はCO₂吸収の場となっていることが明らかになった(茅根・鈴木, 1990; 鈴木ほか, 1991)。その量は、石垣島南東岸の裾礁内礁池において有機物の純生産と炭酸カルシウム骨格の形成とが合わせて15g CO₂/m²/日程度となり、これに単純に日本のサンゴ礁の面積(およそ1,000km²)をかけあわせると、日本のサンゴ礁だけで定常状態で年間およそ600万トンのCO₂を固定していることになる。

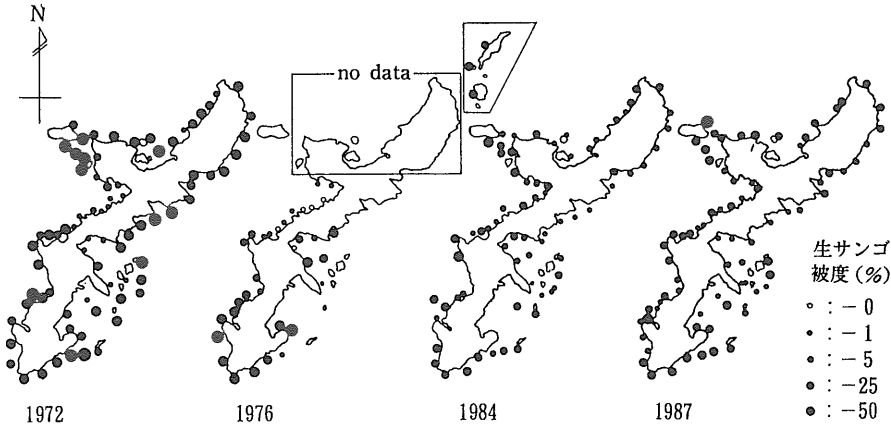
3.2 サンゴ礁の保全・管理

しかしながら、上述の値は琉球列島の中でも比較的サンゴ礁生態系の健全な場所で得られたもので、日本のサンゴ礁はむしろ死滅しつつある(目崎, 1990)。死滅の原因は、オニヒトデによるサンゴの食害、沿岸の開発、陸域からの土砂流出の3つである。

琉球列島では、1970年代から1980年代前半までにオニヒトデが異常発生し、90%以上のサンゴが死亡した。第5図は沖縄本島における1972年から1987年までの生サンゴ被度の変化である。1972年に全体で75%以上あった生サンゴ被度が、1984年には25%以下から数%になっていることが判る。1987年には多少回復しているが、まだほとんどの海岸で被度は25%以下にとどまっている。オニヒトデの異常発生の原因については、自然現象であるという説と人為的な影響を指摘する説とを両極として諸説あり、いまだ定説はない。しかし、サンゴの回復が様々な人為的影響によって遅れているのは事実のようである。

最近ではサンゴ礁をもつ離島の開発が進み、サンゴ礁海域が埋め立てや浚渫などで消滅する例が増えてきた。石垣島白保のサンゴ礁を埋め立てる新石垣空港問題はその典型的な例である。計画案は地元白保の住民の根強い反対と内外のサンゴ礁保護運動の高まりの中で再検討を迫られた。さらに直接の海域の開発だけでなく、陸域の開発もサンゴ礁に大きく影響する。農地などの開発に伴う「赤土流出」は、サンゴの生育ばかりでなくサンゴ礁生態系全体に大きな影響を及ぼしている。最近では、リゾート開発もサンゴ礁の破壊を進めることが懸念されている。

こうしたサンゴ礁の危機は、日本だけの問題ではなく世界的な問題として認識されている(Stoddart, 1981; IUCN, 1988)。もちろん、これまで遅れていたサンゴ礁をもつ離島の経済的発展のための開発は、そこに住む人



第5図 沖縄本島の生サンゴ被度(目崎, 1990)

沖縄島周辺における1972年(Nishira・Yamazato,1974), 1976年(沖縄県観光開発公社, 1976) 1984年(沖縄県北部広域市町村連絡協議会, 1984)および1987年での生サンゴ被度分布の比較

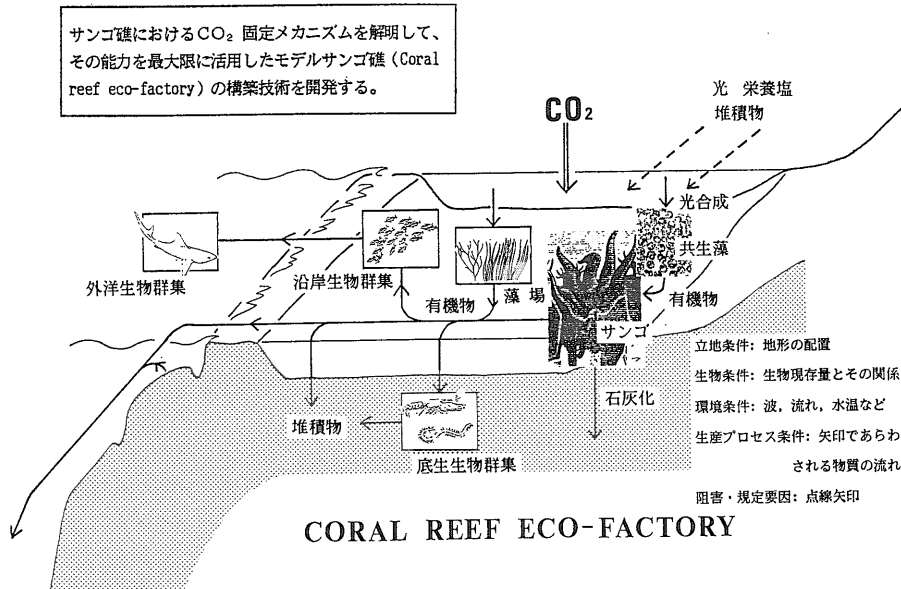
々にとってどうしても必要なものである。しかし、短期的な経済効率ばかりでなく、生産の場であり、独特の生態系をもつ上に、CO₂固定能力をもつサンゴ礁を環境資源(大嶋, 1989)としてとらえ、その保全・管理を進めることはきわめて重要である。

3.3 Coral reef eco-factory

こうした、今あるサンゴ礁をできるだけ守っていこうという受身の策に対して、サンゴ礁におけるCO₂固定メカニズムを解明して、その能力を最大限に活用したサンゴ礁エコ・ファクトリー(Coral reef eco-factory)を構築していこうという積極的な方向もある(第6図)。

そのためには、まず、サンゴ礁における炭素などの物質循環とその収支を解明しなければならない。また物質

循環を指標として、サンゴ礁生態系の維持機構を解明する。次に、サンゴ礁生態系の維持機構とCO₂固定構造を、サンゴ礁の立地因子・生物因子・環境因子・生産プロセス因子ごとに解析する。立地因子とはサンゴ礁地形分帯構成に代表される地形単位の配置であり、生物因子とはサンゴも含めた多様なサンゴ礁生物群集の構造と食物連鎖、共生、競争などによって示される生物間の関係である。また、環境因子とはサンゴ礁の成長を規定する水温、光、波、堆積物などの物理要因であり、生産プロセス因子とは生物の働きによって循環する炭素・栄養塩などの生化学的要因である。こうした各因子の解析結果に基づいて、サンゴ礁形成の阻害要因・促進要因を明らかにして、サンゴ礁の立地条件・群集の最適な配置と環



CORAL REEF ECO-FACTORY

第6図 サンゴ礁エコ・ファクトリー

境条件・生産プロセスの規定因子を検討することによって、CO₂ 固定能力を最大限に活用した Coral reef eco-factory を構築する。

大気中に拡散してしまった膨大な量の CO₂ を固定するためには生物の力を活用するのがもっとも有効である(中山, 1990)。サンゴ礁において固定された CO₂ は、有機物については生物群集・水産資源に、炭酸カルシウムについては生物の棲家で海岸の防波構造物でもあるサンゴ礁地形になるので、投棄や環境への影響を考える必要はない。先に述べたようにサンゴ礁海域の開発と保全は世界的な課題となっているが、本構想はローカルな環境保全・創造を通じて地球環境の保全を目指すものである。CO₂ 固定の場としての coral reef eco-factory の構築技術を熱帯のサンゴ礁地域へ移転することによって、人類の放出する CO₂ の 10% を固定するとともに、海面上昇に対する防波構造物としてのサンゴ礁の形成を促すことと水産資源を確保することが可能となる。

引用文献

- Battistini et al. (1975) : Éléments de terminologie récifale indopacifique. *Téthys*, 7, 1-111.
- Davies, P. J. and Hopley, D. (1983) : Growth fabrics and growth rates of Holocene reefs in the Great Barrier Reef. *BMR Journal of Australian Geol. Geophys.*, 8, 237-251.
- 平井正直 (1991) : 二酸化炭素の生物処理. *日本の科学と技術*, 32-No. 260, 56-58.
- 本多牧生 (1990) : 海洋から見た二酸化炭素問題. *海洋科学技術センター報告*, 24, 189-222.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J. and Ephraums, J. J. eds. (1990) : "Climatic Change: The IPCC Scientific Assessment" Cambridge University Press.
- IUCN (1988) : "Coral Reefs of the World" vol. 1-3 IUCN.
- 霞が関地球温暖化問題研究会編訳 (1991) : 『IPCC 地球温暖化レポート』中央法規出版, 278p.
- 茅根 創 (1990) : 地球規模の CO₂ 循環におけるサンゴ礁の役割. *地質ニュース*, No. 436, 6-16.
- 茅根 創・鈴木 淳 (1990) : 琉球列島石垣島のサンゴ礁における CO₂ 循環と固定能力. 第16回産業公害研究総合推進会議総会研究発表会資料, 124-125.
- Kayanne, H., Ishii, T., Matsumoto, E. and Yonekura, N. (投稿中) : Late Holocene sea-level change on Rota and Guam, the Mariana Islands and its constraint on the earth's rheology and ice melting history. *Quaternary Research*.
- 松本英二 (1991) : 古環境国際協力研究計画の動向. *地質ニュース*, No. 445, 25-29.
- Matsumoto, E., Matsushima, Y. and Miyata, T. (1986) : Holocene sea-level studies by swampy coastal plains in Truk and Ponape, Micronesia. In HIPAC Team "Sea-level Changes and Tectonics in the Middle Pacific" Report of the HIPAC Project in 1984 and 1985 (Second Research), 95-110.
- 目崎茂和 (1990) : サンゴ礁の危機. *サンゴ礁地域研究グループ編『日本のサンゴ礁地域 1 熱い自然-サンゴ礁の環境誌』古今書院, 271-282.*
- Miyagi, T. and Fujimoto, K. (1989) : Geomorphological situation and stability of mangrove habitat of Truk Atoll and Ponape Island in the Federated States of Micronesia. *Sci. Reports of the Tohoku Univ. 7th Ser. (Geography)*, 39, 25-52.
- 中山大樹 (1990) : 資源・エネルギー・環境問題とバイオテクノロジー. *地質ニュース*, No. 427, 6-13.
- Neumann, A. C. and Macintyre, I. G. (1985) : Reef response to sea level rise: Keep-up, catch-up or give-up. *Proc. Fifth Int. Coral Reef Congress*, 3, 105-110.
- 大嶋和雄 (1989) : 環境資源としての東京湾. *NaLPI-News*, 1989-10, 3-4.
- 大隅多加志 (1991) : CO₂ の地球化学的循環と海洋への注入技術. *燃料協会誌*, 70, 225-229.
- Stoddart, D. R. (1981) : Coral reefs: the coming crisis. *Proc. Fourth Int. Coral Reef Symposium*, 1, 33-36.
- 鈴木 淳・中森 亨・茅根 創 (1991) : サンゴ礁生態系における物質生産(II)—溶存成分によるアプローチ. *日本古生物学会1991年年会*.
- 角皆静男 (1989) : 炭素などの物質循環と大気環境—地球環境の変化における海洋の重要性—. *科学*, 59, 593-601.
- 米倉伸之編 (1986) : 『現成サンゴ礁の微地形と浅層構造の研究』昭和60年度科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書, 77p.
- 米倉伸之 (1991) : 第四紀気候変動とそのメカニズム. *地質ニュース*, No. 445, 14-24.

KAYANNE Hajime(1991) : Global warming and coral reefs.

<受付: 1991年 6月30日>