

琉球列島のサンゴ礁の諸問題： 礁形成の解明から生物多様性保全まで

鈴木 淳¹⁾・長尾 正之¹⁾・蓑島 佳代¹⁾・井上麻夕里²⁾・川幡 穂高^{3), 2), 1)}

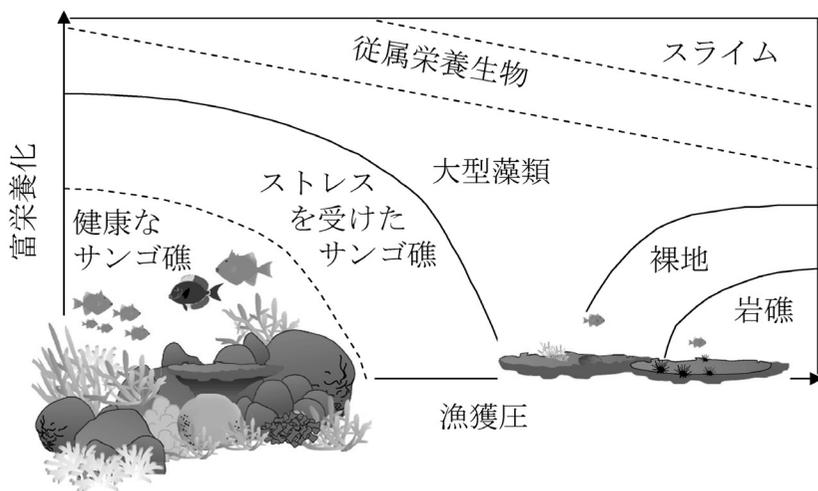
1. はじめに

地球温暖化が進行する現代において、サンゴ礁を取り巻く環境はたいへん厳しい。高い生物生産性と多様性を有しているサンゴ礁は、水産業や観光の場を提供するだけでなく、海岸浸食防止にも利益をもたらす重要なものである。しかし、東南アジアをはじめ、世界的な規模でサンゴ礁の減少・衰退が進んでおり、今後20年以内には全世界の30%のサンゴ礁が劣化するとも言われている。このため、サンゴ礁の保全は国際的にも重要な課題となっており、琉球列島を中心として国内にサンゴ礁を有する日本にとっても緊急性が高い。本小論では、富栄養化、赤土流入、海水酸性化、海面上昇などサンゴ礁において進行中の、あるいは今後の深刻化が危惧される問題を概説し、その実態把握と解明に向けた沖縄海域での研究案を検討する。なお、海水温上昇とサンゴ白化現象については、鈴木・川幡(2004)を参照されたい。

2. 富栄養化によるサンゴ礁の劣化

1970年代以降、人間活動の影響を受けて、変化・荒廃していくサンゴ礁の研究が活発に行われている(Smith *et al.*, 1981)。一般に貧栄養海域に分布するサンゴ礁生態系にとって、リンや窒素などを大量に含む陸水の流入による富栄養化の影響は深刻である。サンゴ礁海域の富栄養化により、大型藻類は活発に繁殖してサンゴ類の被覆度は減少し、サンゴ骨格の石灰化速度が減退するなどの現象が報告されている。サンゴ礁が、サンゴを中心とする群集から藻類を中心とする群集に移行する現象は「phase shift (相遷移)」と呼ばれている(例えば, Hughes, 1994)。

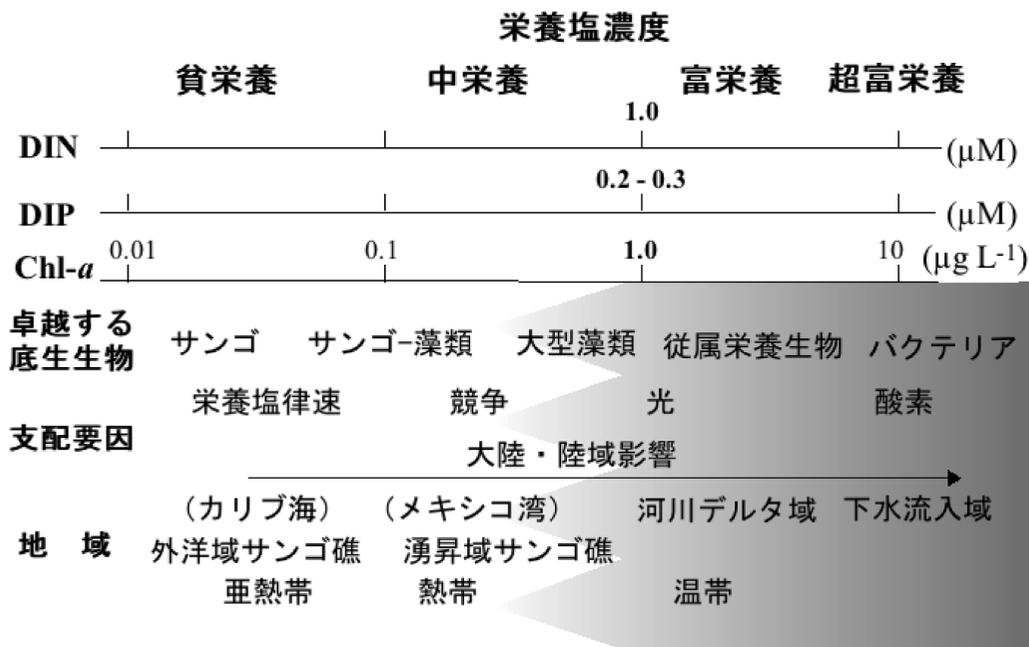
「phase shift」については、サンゴ類と大型藻類の空間をめぐる競争が重要と考えられているが、この競争に影響する因子として海水の栄養塩濃度と海底に到達する光量が挙げられる。また、藻食魚類に対する漁獲圧は、大型藻類の繁茂を助ける効果がある



第1図
サンゴ礁の生物群集が、富栄養化と藻食魚類に対する漁獲圧によって変化して行くことを示す模式図。過度の富栄養化と漁獲圧は生物多様性の低下を引き起こす。Bellwood *et al.* (2004)を改変。

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 東京大学 海洋研究所 海洋底科学部門
3) 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科

キーワード：地球温暖化、富栄養化、水質汚染、赤土、海水酸性化、海面上昇



第2図 サンゴ礁海水の水質とサンゴ礁生物群集との関係。Mutti and Hallock (2003)によって提唱されたChl-a値に、Bell and Elmetri (1995)による栄養塩濃度(DIN, DIP)を対応付けて示した。

(Bellwood *et al.*, 2004). 栄養塩と共に多量の懸濁物が流入すると、共生藻の光合成に必要な日射が遮られサンゴの成長が阻害されて、最終的にはサンゴ礁がスライム状の荒廃した景観へと変化してしまう可能性がある(第1図)。

石垣島については、Kawahata *et al.* (2000)とUmezawa *et al.* (2002)らの研究によって、汀線付近から流れ込む地下水が、サンゴ礁に大量の栄養塩をもたらしていることが明らかにされている。また、鳥取ほか(2004)は、サンゴ礁内での河川起源の赤土の分布状況を報告している。琉球列島における最大の人口密集地である沖縄本島でも南部を中心に、サンゴ礁の富栄養化に加えて、赤土汚染の進行とサンゴ礁海水の濁度上昇は深刻な問題であると考えられるが、いまだ詳細な研究は実施されていない。さらに、沖縄本島周辺海域では、環境ホルモン等の危険化学物質の動態も懸念されている(Kawahata *et al.*, 2004)。

サンゴ礁における富栄養化の指標として、グレートバリアリーフやカリブ海の研究より、海水中クロロフィル濃度 $0.3-0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 、溶存無機態窒素 ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) $1 \mu\text{M}$ 、リン濃度 $0.1-0.2 \mu\text{M}$ がしきい値(閾値)になると提案されている(Bell and Elmetri,

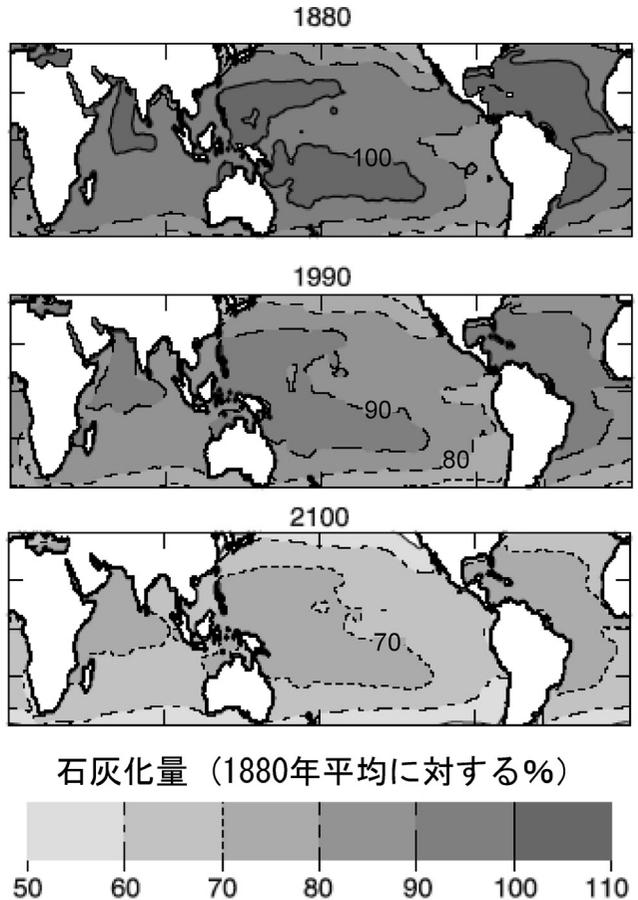
1995)。海水中クロロフィル濃度は、栄養塩を吸収して増える植物プランクトンの量を示している。これらの数値は、毎週の観測を通年実施して得られる平均値を対象にしている。Mutti and Hallock (2003)も、主にカリブ海を対象として、サンゴ礁生物群集の健全度の指標として海水中クロロフィル濃度に注目し、 $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下でサンゴの成長が良好であり、 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ でサンゴと大型藻類の競争が始まり、 $1.0 \mu\text{g L}^{-1}$ の濃度に達すると光が海底に届かなくなってサンゴの生育に障害が発生するとしている(第2図)。

一方で、2004年6月、オーストラリアの研究グループが、わずかなクロロフィル濃度の上昇が、オニヒトデの大発生を引き起こす可能性を水槽実験とモデル研究より明らかにした(Brodie *et al.*, 2003)。この実験によると、海水中のクロロフィル濃度を $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ から $0.4 \mu\text{g L}^{-1}$ へ2倍に増加させたところ、オニヒトデ幼生の生存率は8.6倍と劇的に増加することが明らかにされ、これがオニヒトデの大発生の引き金になるとされた。この結果は、オニヒトデ被害が軽微な北部グレートバリアリーフ海域のクロロフィル濃度が $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 程度であるのに比べ、オニヒトデの異常発生が多発するグレートバリアリーフ中部の沿岸部ではクロロフィ

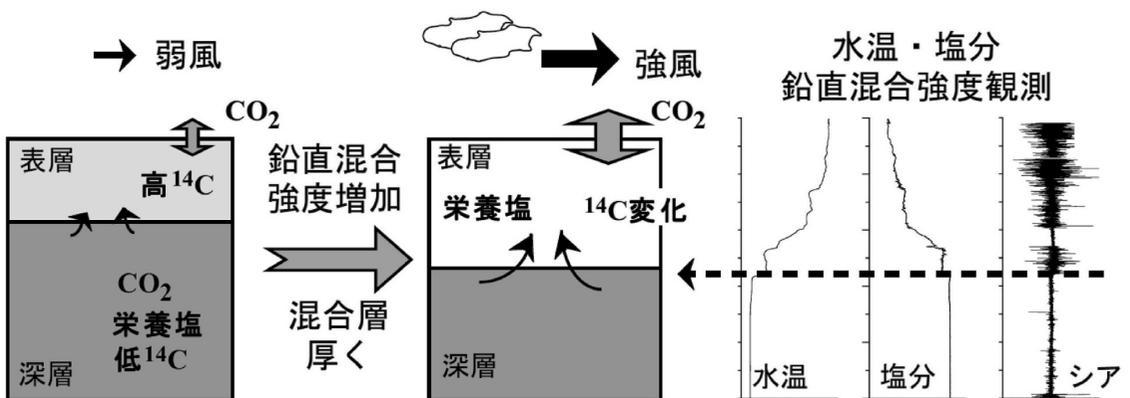
ル濃度がおよそ $0.4 \mu\text{gL}^{-1}$ であるという観測事実とも整合的である。グレートバリアリーフ中部の沿岸部でクロロフィル濃度が高いのは、毎年12月から3月にかけての雨期に、栄養塩に富んだ陸水が流入することが原因である。この時期はオニヒトデの浮遊性幼生期にあたり、餌となる植物プランクトンが増加すると、その生残率は劇的に増加する。従来の富栄養化の閾値と同等か、さらに低い $0.4 \mu\text{gL}^{-1}$ というクロロフィル濃度でオニヒトデの異常発生が誘発されるとすると、沖縄本島南部をはじめとして琉球列島の多くのサンゴ礁もその影響が懸念される。このクロロフィル濃度とオニヒトデ大発生との関係については、引き続き研究の推移を見極める必要がある。

3. 海水酸性化問題と海洋炭酸系の定点長期モニタリング

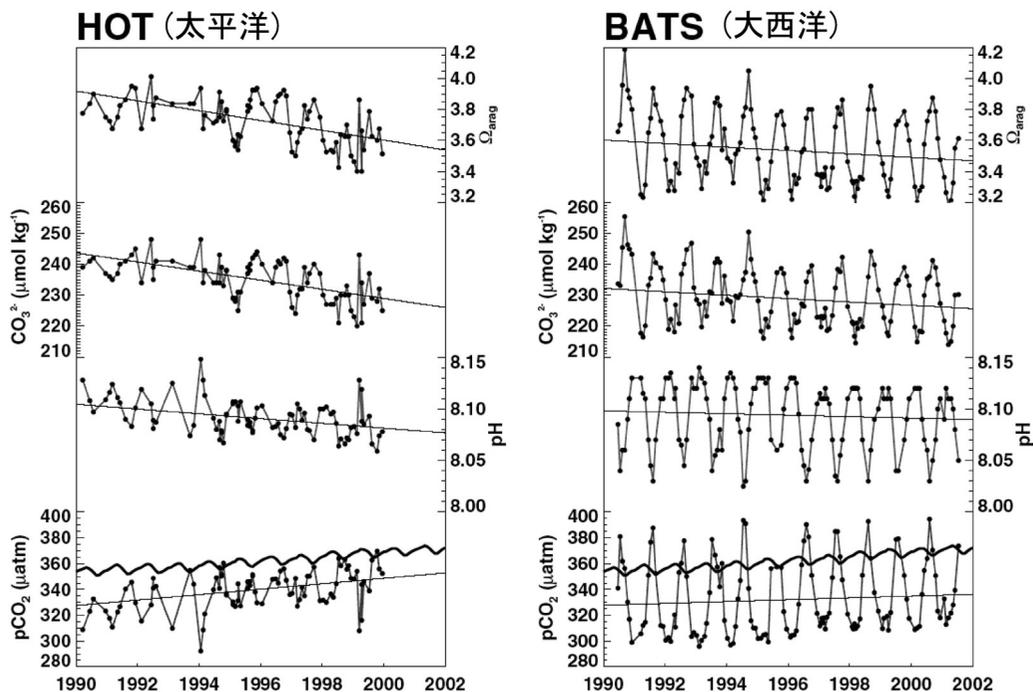
地球温暖化の進行に伴い、海洋表層には各種の変化が生じており、これらは琉球列島海域でも例外ではない。大気中の二酸化炭素が海洋に溶け込んで海水が酸性化するとサンゴ礁の炭酸カルシウム生産が減少することが危惧されている(第3図, Kleypas *et al.*, 1999)。また、海洋表層の水温上昇と塩分低下によって表層と中深層との密度差が増大し、成層強化が進行している。海洋の成層強化は、二酸化炭素濃度が高い深層水の湧昇を妨げる一方で、栄養塩の表層への供給を



第3図 海水の酸性化による海洋生態系の石灰化量の減少 (Kleypas *et al.*, 1999)。1880年を100%として減少量が示されている。



第4図 温暖化による風系変化と表層海水の炭酸系への影響に関する模式図。



第5図 太平洋中部 (HOT: Hawaii Ocean Timeseries station) と大西洋 (BATS: Bermuda-Atlantic Time-series Station) の亜熱帯環流域における海洋表層の炭酸系についての長期間連続モニタリング結果。それぞれの地点について、上からあられ石に対する飽和度、炭酸イオン濃度、pHおよび海水の二酸化炭素分圧が示されている。海水の二酸化炭素分圧 (細線) に加えて、ハワイ・マウナロアで観測された大気中の二酸化炭素分圧のグラフが実太線で示されている。両地点とも海水の酸性化傾向が認められる。Kleypas *et al.* (2006) より。

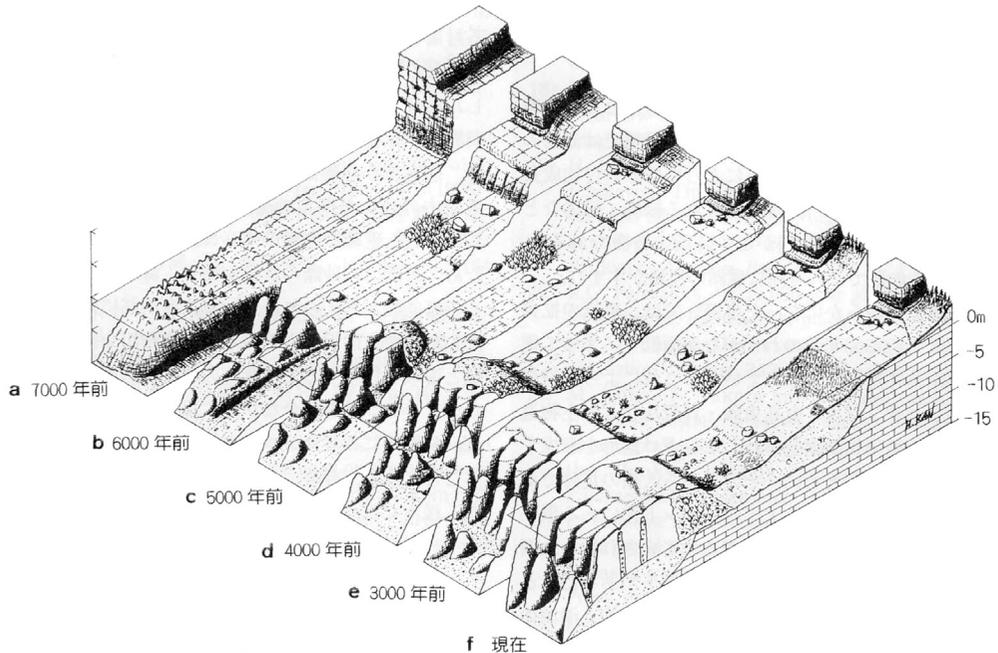
抑制させる。このため、植物プランクトンの生産が衰退し、生物学的ポンプによる二酸化炭素の海洋への吸収量が減少してしまうと危惧されている。一方、温暖化によってエルニーニョ・南方振動現象やモンスーン変動が活発になり海上風が強まると、海洋の鉛直混合強度や混合層の厚さに影響して、表層海水の炭酸系が大きく変化する可能性がある(第4図)。海洋表層の状態変化は、長期的には二酸化炭素の海洋中層貯留など現在検討中の温暖化対策技術の有効性にも影響する。

このような海洋表層の状態変化の解明には、定点での海洋表層中の炭酸系モニタリングが有効である。海外では北大西洋のパミュダ諸島近海で18年間にわたって毎月、海洋表層中の炭酸系を観測した例があり、気候の北大西洋変動との関連が議論されている(第5図)。また中部太平洋ハワイ沖でも同様の長期モニタリングが実施されている。しかし、日本周辺の

北西太平洋での海洋表層の長期的な二酸化炭素変動は、まだ定量的に明らかにされていない。そこで、沖縄海域周辺においても観測が開始されれば太平洋の東西に海洋時系列観測点が揃うことになる。

定点での海洋表層中の炭酸系モニタリングは、陸域の影響を避けて外洋域で観測を行う必要があり、一般には高い頻度での観測が難しい。沖縄海域の場合、専用観測船を使わなくても、離島から小型船を備船して観測点に移動し計測を行うことが可能で、費用を抑えつつ観測頻度を増加させることができる。なお、近隣に大気二酸化炭素濃度の観測施設が置かれており、海洋観測地点に近いので、これらのデータを活用することができる。

海洋表層中の二酸化炭素濃度を規定する要因として、混合層の物理過程が注目されている。海上風が強まり混合層が攪拌されると、混合層の厚さが増加し、中層水が表層に取り込まれる連行現象 (entrain-



第6図 琉球列島における完新世サンゴ礁の形成過程(菅, 2002). 完新世サンゴ礁の基盤として, 現海面下約10mの平坦面が想定されている(a). 海面が上昇した後(b), サンゴ礁が海面に達するまでの間(d)は, 海岸に押し寄せる波浪により, 陸側の浸食が活発であったと推定される.

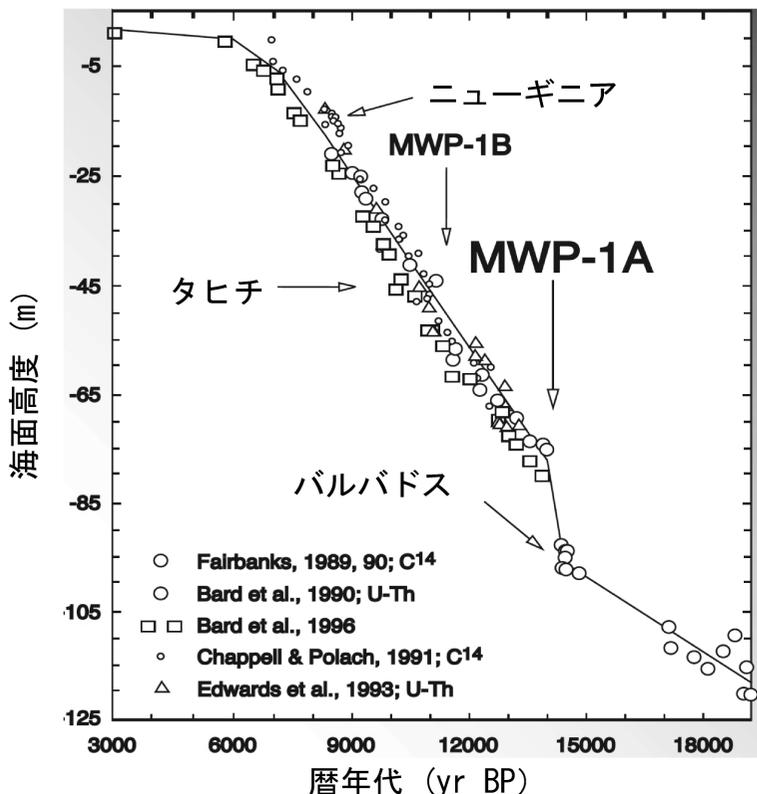
ment) が起こる(第4図). このとき中層から供給される栄養塩や二酸化炭素が, 植物プランクトンの一次生産量などを介して表層中の二酸化炭素濃度に影響する. 海洋鉛直微細構造測定装置を使用して鉛直混合強度を直接観測し, 混合層の物理過程の解明を試みることは興味深い(長尾ほか, 2007).

北太平洋の気候変動は, 数年から数十年の時間スケールを持つため, 過去に遡って海洋表層の鉛直混合の変遷を明らかにすることは重要である. 大気上層で生成する放射性炭素(炭素14)は半減期5730年で窒素に壊変して消失していく. 海洋の中深層には, 沈み込んでから数百年が経過した海水が存在し, この海水中の放射性炭素濃度は表層に比べて低い. したがって, 湧昇や鉛直混合によって深層水が表層にもたらされると, 表層水の放射性炭素濃度が減少する. さらに, 1950年代の大気中核実験によって放出された大量の放射性炭素は, 表層と中深層海水中の放射性炭素の濃度差を拡大させて, 表層水の成層化や表層海流系変化の鋭敏なトレーサーとなっている. この炭素は, 地球温暖化現象の実態解明と予測に重要なパラメータであると世界的に認識されている. サン

ゴ骨格は炭酸カルシウムから構成され, この中の炭素は海水中の放射性炭素濃度の過去の変化をモニターするための分析試料として適している. 今後, 琉球列島海域でも, 海洋表層の炭酸系モニタリングと併せて, サンゴ骨格の放射性炭素濃度変化の研究が必要と思われる.

4. 海面上昇とサンゴ礁の上方成長

サンゴ礁は, 多種多様な生物の棲み場所であると同時に, サンゴなどの炭酸塩殻が堆積してできた地質学的な構造物でもある. サンゴ礁に関する環境問題のいくつかは, その解決の糸口を探るために, サンゴ礁形成に掛かる地質学的な背景を理解する必要がある. 今後数百年に渡って進行すると考えられる地球温暖化は, 海水温の上昇のほか, 海面上昇と海水の酸性化を伴う. 海水温の上昇は, サンゴ白化を頻発化させ, 海水の酸性化は, サンゴ礁の基盤となっている炭酸カルシウムの生物殻堆積物や石灰岩の溶解を促進させる. 海面上昇も海岸侵食の危険性を高めるため, 地球温暖化はサンゴ礁に深刻な打撃を



第7図
タヒチ、バルバドスおよびパプアニューギニアのサンゴ礁掘削から復元された最終氷期以降の海水準変動史。2回の融氷パルス(MWP-1A, 1B)に対応した海水準の上昇が認められる。Camoin *et al.* (2005)より。

与えることが懸念される。

今後の海水準上昇に対してサンゴ礁がどのように応答するかを知るために、後氷期の海水準上昇に対するサンゴ礁形成過程を見ていこう(第6図)。現成サンゴ礁における多孔浅層掘削の結果を総括した菅(2001)によると、琉球列島における完新世サンゴ礁は、現海面下約10~20mの平坦面を基盤として約8,500~7,900年前に成長を開始したと考えられている。海面は、約2万年前の最終氷期最盛期の後上昇し、約8,000年ほど前にほぼ現在のレベルで安定した。一方、サンゴ礁が海面に達する時期は、約7,500~4,000年前であり、地域による差異が認められる。サンゴ礁が海面に達するまでの間は、海岸に押し寄せる波浪により、陸側の浸食が活発であったと推定される(菅, 2002)。

上述のように、琉球列島のサンゴ礁に見られる完新世のサンゴ礁形成は、上昇した海面に対して遅れて追いつくCatch up型を示すが、これは比較的高緯度に位置するために、炭酸カルシウム生産量が少なく造礁能力が低いからと考えられる。では、より低緯

度域のサンゴ礁は、融氷期の海面上昇に対してどう応答したであろうか? Bard *et al.* (1996)らの結果をもとに、Camoin *et al.* (2006)によりコンパイルされた最終氷期以降の海水準の変化を第7図に示した。カリブ海バルバドスのサンゴ礁では、融氷期の海面上昇にサンゴ礁の成長が追い付いている様子が示唆される。このような海面上昇に対するサンゴ礁の応答は、今後の海面上昇に対するサンゴ礁の対応能力を評価する上で重要であるが、最終氷期から現在までをカバーする研究はこのバルバドスの例のみである。

現在よりも海水準が低かった融氷期のサンゴ礁形成過程は、浅層掘削で解明するのは難しく、より大規模な科学掘削が必要となる。2003年に開始された統合国際深海掘削計画(IODP)は、特定任務掘削船(MSP)を用いた浅海域掘削も実施対象としており、2005年11月にはフレンチポリネシアでサンゴ礁掘削 Expedition 310を実施した。グレートバリアリーフでも掘削の計画があり、同様に琉球列島のサンゴ礁も掘削対象として興味深い。IODPへの課題提案には、掘削予定地点について充実した予備調査データ(水深、

音響探査など)の提出が求められており、課題提案を見据えての基礎データ収集も重要である。また、島棚を対象としてドレッジを行い、サンゴ化石等を採取して放射性炭素およびウラン系列年代を測定すれば、サンゴ礁の形成史解明に有用な情報が得られる(Camoin *et al.*, 2006; Yokoyama *et al.*, 2006)。

サンゴ礁としては高緯度に位置する琉球列島の場合、地球温暖化に伴う海水準上昇にはサンゴ礁の成長が追いつかない可能性が高い。今後、海面の上昇そのものによる浸水被害に加え、沿岸に押し寄せる波浪強度の増大によってサンゴ礁の海岸浸食が進むことが懸念される。完新世の事例に見るように、上昇した海面にサンゴ礁の上方成長が追いつくまでに数百年から数千年以上の時間がかかると予想される。富栄養化等により劣化したサンゴ礁の場合は、さらに造礁能力の低下が懸念される。そこで、サンゴ礁保全策を推進して、陸域の人為活動起源の直接的負荷を軽減しておくことは、地球温暖化時代のサンゴ礁崩壊のリスクを低下させるために必須であろう。

5. おわりに

サンゴ礁の保全と再生の促進は、地域社会の環境と経済の好循環による持続可能な発展に貢献する。沖縄県では近年、漁獲量の低下と漁獲される魚のサイズの低下が著しい。健全なサンゴ礁は、魚類や甲殻類、藻類など多様な生物に生息場所を提供するため、サンゴ礁の健全度の向上により、長期的には漁獲量の回復が期待される。また、美しい水中景観が維持されると、ダイビングやエコツアーなどの観光産業の維持育成にも効果がある。地政学的にも重要な南西諸島や伊豆小笠原諸島の海岸線の多くがサンゴ礁に縁取られている日本にとって、サンゴ礁保全は、国土の保全や排他的経済水域の確保(沖ノ鳥島)にも関係する重要問題である。

本小論では、富栄養化、赤土流入、海水酸性化、海面上昇などサンゴ礁において現在進行中の問題について紹介した。これらの課題は、産総研・地質情報研究部門の重点課題として策定中の「沖縄海域プロジェクト」の一部としてアプローチ可能な研究要素を含んでいる。沖縄本島周辺海域での水質および底質調査、海洋炭酸系長期モニタリング点の選定に関する予備的検討、さらに、サンゴ礁形成過程解明のため

の基礎情報整備などが、これに当たると思われる。沖縄海域の環境問題の解明は、地質情報研究部門・物質循環研究グループのミッションである4つの「環境」すなわち「都市環境」、「沿岸環境」、「外洋環境」、「古環境」を対象にして地球化学的手法を用いて将来の都市・沿岸・地球環境の予測手法を開発するという目標にも合致するものである。

謝辞：産総研・物質循環研究グループ長・田中裕一郎博士には研究全般に渡り有益な御助言を頂いた。水産研究総合センター西海区水産研究所石垣支所・渋谷拓郎博士、海洋研究開発機構・丸山 正博士、山本啓之博士、古島靖夫博士ならびに琉球大学・酒井一彦博士には、サンゴ礁研究に関して貴重なアドバイスを頂いた。University of Minnesotaの松本克美博士には、海洋炭酸系モニタリングについてご教示頂いた。東京大学大学院・横山祐典博士、岡山大学・菅 浩伸博士にはサンゴ礁形成に関してご教示頂いた。東北大学大学院・北田幸男氏、琉球大学大学院・森本直子氏には原稿を読んで頂きコメントを頂いた。産総研・荒井晃作博士には本稿執筆の機会を与えて頂いた。記して謝意を表します。本研究は、産業技術総合研究所運営交付金および環境省地球環境研究総合推進費「サンゴ礁生物多様性地域の選定に関する研究」の成果の一部である。

引用文献

- Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L.F., Cabioch, G., Faure, G. and Rougerie, F. (1996) : Deglacial sea level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, 382, 241-244.
- Bell, P.R.F. and Elmetri, I. (1995) : Ecological indicators of large-scale eutrophication in the Great Barrier Reef Lagoon. *Ambio*, 24, 208-215.
- Bellwood, DR., Hughes, TP., Folke, C. and Nystrom, M. (2004) : Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, 827-833.
- Brodie, J., Fabricius, K., De'ath, G. and Okaji, K. (2003) : Are increased nutrient inputs responsible for more outbreaks of crown-of-thorns starfish? An appraisal of the evidence. CRC Reef Research Centre Technical Report No. 53.
- Camoin, G., Cabioch, G., Eisenhauer, A., Braga, J.-C., Hamelin, B. and Lericolais, G. (2006) : Environmental significance of microbialites in reef environments during the last deglaciation. *Sedimentary Geology*, 185, 277-295.
- Camoin, G.F., Iryu, Y., McInroy, D. and the Expedition 310 Project Team (2005) : The last deglacial sea level rise in the South Pacific: offshore drilling in Tahiti (French Polynesia). *IODP Sci. Prosp.*, 310. doi:10.2204/iodp.sp.310.2005.
- Hughes, TP. (1994) : Catastrophes, hase shifts and large-scale degra-

- dation of a Caribbean coral reef. *Science*, 265, 1547-1551.
- 菅 浩伸 (2001) : 南西諸島を縁どるサンゴ礁海岸. 米倉伸之, 貝塚 爽平, 野上道男, 鎮西清高編『日本の地形1 総説』7-5章(3), 東京大学出版会, p255-258.
- 菅 浩伸 (2002) : サンゴ礁の形成過程と沿岸の環境変化-海面上昇と完新世高エネルギーウィンドウの再来-. *日本海水学会誌*, 56, 123-127.
- Kawahata, H., Yukino, I. and Suzuki, A. (2000) : Terrestrial influence on the Shiraho fringing reef, Ishigaki Island, Japan: high carbon input relative to phosphate, *Coral reefs*, 19, 172-178.
- Kawahata, H., Ohta, H., Inoue, M. and Suzuki, A. (2004) : Endocrine disrupter nonylphenol and bisphenol A contamination in Okinawa and Ishigaki Islands, Japan - within coral reefs and adjacent river mouth-. *Chemosphere*, 55, 1519-1527.
- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J.-P., Langdon, C. and Opdyke, B.N. (1999) : Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284, 118-120.
- Kleypas, J.A., R.A. Feely, V.J. Fabry, C. Langdon, C.L. Sabine and L.L. Robbins (2006) : Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18-20 April 2005, St. Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey, 88 pp.
- Mutti, M. and Hallock, P. (2003) : Carbonate systems along nutrient and temperature gradients: some sedimentological and geochemical constraints. *Int. J. Earth Sci.*, 92, 465-475.
- 長尾正之・橋本英資・高杉由夫・児島正一郎・佐藤健治・森本昭彦・鈴木 淳・渋谷拓郎 (2007) : 八重山諸島周辺での物理環境計測. *地質ニュース*, no.634, 43-49.
- Smith, S. V., Kimmerer, W. J., Laws, E. A., Brock, R. E. and Walsh, T. W. (1981) : Kaneohe bay sewage diversion experiment: Perspectives on Ecosystem response to nutritional perturbation. *Pacific Sci.* 35, 279-402.
- 鈴木 淳・川幡穂高 (2004) : 骨格の酸素・炭素同位体比にみるサンゴ白化現象の記録. *地球化学*, 38, 265-280.
- Suzuki, A., Gagan, M.K., De Deckker, P., Omura, A., Yukino, I. and Kawahata, H. (2001) : Last Interglacial coral record of enhanced insolation seasonality and seawater ¹⁸O enrichment in the Ryukyu Islands, northwest Pacific. *Geophys Res Lett* 28, 3685-3688.
- 鳥取海峰・長尾正之・森本直子・井上麻夕里・岩瀬晃啓・渋谷拓郎・藤岡義三・大葉英雄・菅 浩伸・鈴木 淳 (2004) : 琉球列島の石垣島周辺のサンゴ礁における底質と海水濁度の関係, *Galaxea, JCRS*, 6, 1-19.
- Umezawa, Y., Miyajima, T., Kayanne, H. and Koike, I. (2002) : Significance of groundwater nitrogen discharge into coral reefs at Ishigaki Island, southwest of Japan. *Coral Reefs*, 21, 346-356.
- Yokoyama, Y., Purcell, A., Marshall, J. F. and Lambeck, K. (2006) : Sea-level during the early deglaciation period in the Great Barrier Reef, Australia. *Global and Planetary Change*, 53, 147-153.

SUZUKI Atsushi, NAGAO Masayuki, MINOSHIMA Kayo, INOUE Mayuri and KAWAHATA Hodaka (2007) : Geological problems of coral reefs in the Ryukyu Islands: from reef formation study to biodiversity conservation.

<受付: 2007年3月27日>