

課題名	RF-082 北限域に分布する造礁サンゴを用いた温暖化とその影響の実態解明に関する研究		
課題代表者名	渡邊 剛（北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門）		
研究期間	平成20－21年度	合計予算額	18,000千円（うち21年度 8,900千円） ※予算額は、間接経費を含む
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 造礁サンゴ骨格を用いた温暖化とその影響の検出に関する研究（北海道大学）</p> <p>(2) 造礁サンゴの分類と群集に対する温暖化影響評価に関する研究（福岡大学）</p> <p>(3) 造礁サンゴ分布の把握とデータベース化に関する研究（独立行政法人国立環境研究所）</p>		
研究概要	<p>1. はじめに（研究背景等）</p> <p>大気中の二酸化炭素濃度の増加に伴い、海洋において海水温の上昇と酸性化が起きている。IPCC第4次評価報告書においては、水温上昇とともに、海洋酸性化の影響の重大さに関して言及され、水温上昇と海洋酸性化の実態の解明とともに、これらの海洋生態系への影響を評価することが急務であるとしている。</p> <p>造礁サンゴ（以下、サンゴ）は、水温上昇（代謝の変化、白化現象）と海洋酸性化（石灰化阻害）の両方の影響を受ける。これらの影響は、サンゴの成長速度・密度や微量金属元素・安定同位体比という形で骨格に記録されるとともに、長期的にはサンゴの分布・被度や群集構成の変化をもたらす。塊状のサンゴは骨格年輪を形成し、100年以上にわたり生存するものがあるため、沿岸域において環境を長期かつ高時間分解能で復元できる唯一のツールである。サンゴは熱帯から温帯まで広く分布するが、日本及び韓国の温帯域は造礁サンゴ分布の北限にあたり、そこに分布するサンゴは環境の変化に対して非常に敏感に応答すると考えられる。実際に、日本の温帯域においては、熊本県天草でサンゴ被度の増大やサンゴ分布の北上が観察されたり、2006年に和歌山県串本で熱帯性のサンゴが発見されたりしており、海水温上昇がサンゴの分布に影響を与えている可能性が指摘されている。しかしながら、これまで温帯域のサンゴ群集は、熱帯域と比較して環境復元、分布、分類すべての点において実態把握と温暖化の影響評価が遅れていた。環境変動に対する敏感さを考慮すると、温帯域に棲息するサンゴに関して、<u>地球温暖化に伴う水温上昇と海洋酸性化の記録者としての評価と、地球温暖化が沿岸生態系へ与える影響例としての評価</u>という二つの側面から早急に検討する必要がある。</p> <p>熱帯から温帯にかけての水温勾配に従ったサンゴの分布状況を把握し、群集構成を記載して水温との関係を解析することにより、温帯における熱帯性の種の分布状況とともに、海水温上昇がサンゴ群集に与える影響を評価することが可能である。一方、これまで熱帯～亜熱帯域において塊状のハマサンゴ群体を利用して環境復元が行われてきたが、温帯域においては塊状サンゴを用いた長期における環境復元例はない。しかしながら、長期の環境変動を記録していると考えられる塊状サンゴの大群体は温帯域の熊本県、長崎県、高知県、徳島県などでも存在が確認されており、一部はすでに提案者らによってコアが採取されている。これらは100年以上の環境変動とそれに伴う成長や骨格密度を記録しており、日本周辺の温帯域において、水温上昇・海洋酸性化の実態とそれがサンゴ群体に与える影響を明らかにすることができると考えられる。また、復元された水温上昇・海洋酸性化の実態に関するデータは、我が国周辺の生態系への温暖化影響を評価するための基礎データとして利用する。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>造礁サンゴの分布の北限域にあたる日本から韓国にかけて、緯度方向の水温勾配を考慮して調査地点を設定し、造礁サンゴの分布様式を明らかにする（サブテーマ1）。その上で、代表的な地点を選定して群集構造を記載し、環境要因との関係を明らかにする（サブテーマ2）。同時に、年輪解析が可能なサンゴをサンプリングし、サンゴ骨格の成長量や密度の違い、骨格に含まれる安定同位体比・微量金属と環境要因との関係を明らかにする（サブテーマ3）。以上により、現在までの水温上昇と海洋酸性化の実態を明らかにし、それらがサンゴ群集と群体に与える影響を評価する。これらのサン</p>		

ゴ分布や環境変化のデータを統合し（サブテーマ3）、他の生態系への影響評価を行う際の基礎データとするとともに、将来の追跡調査の際の比較参照データとする。

3. 研究の方法

（1）造礁サンゴ骨格を用いた温暖化とその影響の検出に関する研究

造礁サンゴ礁の分布北限域である九州、および造礁サンゴ分布の北限域にあたる四国・本州において1）従来熱帯～亜熱帯域で環境復元のために用いられてきたハマサンゴ以外にも、年輪解析が可能な塊状サンゴ種を探し、2）サンゴ骨格の成長量や密度の違いと環境要因の関係、3）骨格に含まれる安定同位体比・微量金属と環境要因との関係を明らかにするため、（1）においては、サブテーマ2と3により得られたサンゴの種とその分布データに基づき、九州西部の甕島（鹿児島県）、四国南部の竜串（高知県）、本州最南端の串本（和歌山県）から、ハマサンゴに加えキクメイシやニホンアワサンゴなど、温帯域に多く分布する塊状のサンゴを中心に骨格試料を採取し、得られた試料を塊状群体の最大成長軸方向に沿って骨格を板状に切った後、軟X線画像撮影により年輪の検出を行った。さらに、過去100年間程度の温暖化履歴を持つ大型の造礁性サンゴ群体では世界の北限域に位置する日本周辺海域の日本海側（長崎県壱岐と鹿児島県甕島）と太平洋側（和歌山県串本と高知県竜串）からそれぞれ2地点で水中掘削によりサンゴコア試料を取得し、それらの酸素・炭素安定同位体比および石灰化量を解析した。

（2）造礁サンゴの分類と群集に対する温暖化影響評価に関する研究

日本本土の中でも特に過去の研究例が少ない九州西岸から隠岐諸島にかけて生息する造礁サンゴの群集構造や分布パターンを緯度ごとに定量的に記載し、地域ごとの特徴を黒潮の支流である対馬海流の北上に併せて検討するため、北緯32°から北緯36°の範囲の対馬海流沿いに位置する甕島列島上甕島北東部の市ノ浦（北緯31°50'）、五島列島福江島南西部の布浦（北緯32°40'）、五島列島若松島南西部の滝ヶ原（北緯32°50'）、壱岐中西部の黒崎（北緯33°50'）、対馬中西部の瀬ノ浦（北緯34°30'）、そして隠岐諸島島前南東部と島後南西部に挟まれた島前松島周辺（北緯36°10'）を対象地域として、調査を行った。島前・島後を除く各調査地点では、海岸線に対して垂直方向に調査基線を設置し、基線に沿った地形断面図の作成および生息する造礁サンゴ群集の定量分布調査を行った。一方、島前と島後では、造礁サンゴの生息地点も群体数も極めて限られていたため、こうした定量調査は行わず、生息種と生息環境の記録のみを行った。

（3）造礁サンゴ分布の把握とデータベース化に関する研究

サンゴ分布北限域にあたる九州、四国、本州において、1）サンゴの大局的な分布パターンを把握すること、2）過去の報告書や新たに得られたサンゴ分布情報のデータベース化を行い、過去からの変化を解析するために以下の方法を用いた。1）に関しては、分布北限域ではサンゴは波当たりの弱い内湾に分布することが指摘されているため、波当たりに着目し、波当たりの弱い内湾でのサンゴ分布を踏査して確認するとともに、外洋に面した海域では、波当たりの弱くなる水深の大きい地点に着目してサンゴの探索を行った。地元への聞き取り調査とともに、国際サンゴ礁年活動「日本全国みんなで作るサンゴマップ」に寄せられた一般ダイバーやスノーケラーからの情報の整理を行った。現地調査の際には、水深の小さい地点に関してはスノーケルを、水深の大きい地点に関してはSCUBA潜水を用いた。この結果、鹿児島県甕島、長崎県壱岐・対馬においては、大規模な群集が内湾に成立しているのが観察された。一方、外洋に面した海域においては、水深5mより深い地点にサンゴ群集が主に分布しているのが観察された（島根県隠岐、静岡県伊豆など）。2）のサンゴ分布情報のデータベース化に関しては、1970年代には、海中公園制定のためのサンゴ分布と種に関する調査が行われているため、これら報告書や論文類の収集を行った。過去の報告書・論文に報告されているサンゴ種と現在のサンゴ種の比較を行った。

4. 結果及び考察

（1）造礁サンゴ骨格を用いた温暖化とその影響の検出に関する研究

熱帯～亜熱帯で広く環境復元に利用されてきたハマサンゴ以外にも、温帯域ではキクメイシやアワサンゴの骨格から年輪が検出され、これを用いた同位体比および微量元素の分析により、季節変動に対応する変動が検出されたことから、これらのサンゴ種が今後温帯域での環境復元に関して有力なアーカイブとなると言える。またサンゴの骨格密度に関しては、種によっては温帯域で熱帯～亜熱帯域より明らかに小さいことが示され、今後の温暖化影響指標として有効である可能性がある。本研究で

は、日本周辺の温帯域の日本海側から2地点（長崎県壱岐と鹿児島県甬島）と太平洋側の2地点（和歌山県串本と高知県竜串）より100年から数100年間の期間を遡ることのできるサンゴコア試料をそれぞれ掘削することに成功した。これらのサンゴコア試料について、酸素・炭素安定同位体比及び骨格成長量・密度・石灰化量を解析した。これらの結果、サンゴ骨格の酸素同位体比には水温と降水量、炭素同位体比には、日射量と化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度変動（温暖化による環境変動）、骨格成長量・密度・石灰化量には造礁性サンゴの成長の履歴（環境変動に対する応答）が記録されていることが明らかになった。過去100年間におけるこれらのサンゴコア（サンゴ年輪）記録には、温暖化傾向と化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度の増大の傾向が読み取れ、また、それに対するサンゴの成長の応答は、日本海側と太平洋側では異なることが明らかとなった。

（2）造礁サンゴの分類と群集に対する温暖化影響評価に関する研究

造礁サンゴは、甬島列島では島の周囲のどの地点でもみられたが、緯度の増加とともに生息域が分散化・局所化していく傾向がみられた。生息種数と被覆率は、少なくとも天草諸島以北では外洋に近い島影あるいは西岸のやや遮蔽的な湾の湾口で高い傾向にあった。調査範囲内での生息種数は、緯度とともに減少し、特に五島列島と壱岐・対馬の間および壱岐・対馬と隠岐諸島の間で急激に減少した。被覆率は、五島列島までは次第に減少するが、そこから壱岐・対馬にかけて再び増加する傾向がみられた。各海域で卓越する群集は、上甬島付近では亜熱帯性の卓状・枝状ミドリイシであった。特にクシハダミドリイシやスギノキミドリイシが優占していた。次に、天草諸島から五島列島にかけては、温帯性の卓状・枝状ミドリイシと被覆状～塊状のサンゴであった。また、ここでもクシハダミドリイシやスギノキミドリイシの生息が確認された。さらに、壱岐・対馬海域では、温帯性の卓状ミドリイシ種は見られず、塊状のキクメイシ数種と葉状～被覆状のサンゴが大部分を占めていた。そして隠岐諸島海域では、群集は構成されずわずか3種の塊状～被覆状サンゴの生息が確認されたのみであった。

各海域で卓越する群集は、まず上甬島付近では、亜熱帯性の卓状・枝状ミドリイシ（クシハダミドリイシやスギノキミドリイシ）であった。次に、天草諸島から五島列島にかけては、温帯性の卓状・枝状ミドリイシと被覆状～塊状のサンゴに遷移していた。さらに、壱岐・対馬海域では、温帯性の卓状ミドリイシ種はみられず、塊状のキクメイシ数種と葉状～被覆状のサンゴへと遷移していた。このように、緯度変化（水温勾配）に伴いサンゴ群集が遷移していく様子が明瞭に確認された。中でも、五島列島で確認されたクシハダミドリイシやスギノキミドリイシは、過去の学術調査で出現が確認されていないため、最近この海域まで北上した可能性が高い。

（3）造礁サンゴ分布の把握とデータベース化に関する研究

長崎県五島列島でクシハダミドリイシとスギノキミドリイシ、千葉県館山でエンタクミドリイシの新たな出現が示された。また、和歌山県串本において21種のサンゴ出現が示されたという報告や、熊本県天草においてエンタクミドリイシ分布が拡大しているとの報告もある。現地調査においては、サブテーマ2と共同でサンゴ分布調査を行って種同定を行うとともに、大規模なサンゴ群集が発見された対馬と壱岐においてサブテーマ1と共同で、ダイビングタンクを用いた掘削機で掘削を行い、得られた化石サンゴの年代測定を行った。その結果、化石サンゴは、約3500年前の年代を示した。これは、当該海域で今まで得られているサンゴ礁形成年代（約1400年前）より古く、サンゴ礁の形成がさらに長期にわたっていたことを示している。3）に関しては、サンゴ群集は、いくつかの群集構造に区分されたことと、環境省「モニタリングサイト1000事業」により、熊本県天草、長崎県五島・壱岐・対馬、高知県南岸、和歌山県串本、千葉県館山においてモニタリング（サンゴ種ではなく被度に基づく）がなされていることと、2）の結果を考慮して、定点モニタリングサイトを提案した。

聞き取り調査や現地調査を行った結果、サンゴは内湾や水深が大きく波当たりの弱い地点に分布しており、サンゴ分布は主に波当たりに規定されていると考えられる。また、過去の報告書・論文に報告されているサンゴ種と現在のサンゴ種の比較を行った結果、長崎県五島列島でクシハダミドリイシ、千葉県館山でエンタクミドリイシの出現が示された。いずれも、既存の報告書・論文では当該海域より南方での分布が示されているため、最近の温暖化に伴って分布が拡大していることを示す可能性がある。また、そうした情報に基づいて、今後の定点モニタリングサイトを提案した。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

1) 造礁サンゴ骨格を用いた温暖化とその影響の検出に関する研究

本研究により、温帯域の造礁性サンゴを用いた環境解析が可能である事を示した。また、特定のサンゴ種では骨格成長量・密度および石灰化量に関して、迅速で簡便な定量化手法に目途がついた。また特定種では温帯域の骨格密度が熱帯～亜熱帯のそれと有意に異なることから、今後これらを温暖化指標として利用できる。また、長尺サンゴコア試料の解析の結果、サンゴ骨格の酸素同位体比から過去100年間の水温上昇、炭素同位体比からは、化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度変動（温暖化による環境変動）、骨格成長量・密度・石灰化量からは造礁性サンゴの成長の履歴（環境変動に対する応答）をそれぞれ抽出することに成功した。

2) 造礁サンゴの分類と群集に対する温暖化影響評価に関する研究

本研究のような日本列島の温帯域に生息する造礁サンゴ群集の緯度変化に関する基礎データは、それらを含む沿岸生態系のモニタリングや保全を進めていく上で非常に重要である。例えば、クシハマミドリイシは天草諸島海域では稀な種であったが、30年前には確認されていなかった五島列島まで生息域を拡大していることが本研究により確認された。この例から、サンゴ群集を調査し、データを蓄積することで温暖化影響評価が可能であることが示唆された。

3) 造礁サンゴ分布の把握とデータベース化に関する研究

本研究により、九州・四国・本州沿岸におけるサンゴ分布域を物理環境により推定できる可能性があり、今後の重点モニタリング・保全区域の策定に応用できる可能性が明らかになった。また、サンゴ分布に関して統一的なデータベース化を行うことにより、最近の温暖化の影響によりサンゴ分布が北に拡大している可能性が示された。また、そうした情報に基づいて、今後の定点モニタリングサイトを提案した。

(2) 地球環境政策への貢献

1) 造礁サンゴ骨格を用いた温暖化とその影響の検出に関する研究

日本周辺海域からのサンゴコア試料及びその記録は、大型の造礁性サンゴの世界の北限域に位置しており、我が国の沿岸域における非常に貴重な温暖化履歴となり得る。また、日本周辺海域における地球温暖化および二酸化炭素濃度の変動は、その実体の解明に役立つと共に、今後の対策を決定する上で貴重な判断材料を提供すると思われる。さらに、これらの温暖化や海洋酸性化に対する造礁性サンゴの応答履歴は、今後の生態系の推移の予測に資するものである。これらの記録及び成果は、今後、日本周辺海域における地球温暖化および海洋酸性化の変動を定量的に評価する際の基礎データとなる。

2) 造礁サンゴの分類と群集に対する温暖化影響評価に関する研究

現在生息域の拡大・北上が確認されている種、あるいは今後それらが予想される種の生息域と表層海水温の関係を明らかにし、これらの種を重点的にモニタリングすることが、現在温帯域の沿岸生態系がどのように変化し、造礁サンゴをはじめとする生物群集が温暖化とどのような応答をしているかを解明する手がかりになることが期待される。また、生息種数が急激に減少する五島列島～壱岐・対馬間と壱岐・対馬～隠岐諸島での造礁サンゴ群集のモニタリングについても、同様の成果が期待できるものと考えられる。

3) 造礁サンゴ分布の把握とデータベース化に関する研究

本研究における成果を踏まえ、中緯度域におけるサンゴ探索の際には波当たりを考慮することが重要であるといえ、今後のモニタリング地点の選定に関する指針を与えるものである。また将来的には、波当たりや水深などの統一的な物理環境データベースを用いて各地域を特徴付け、サンゴの分布が可能な地域を抽出できる可能性がある。さらに今後は、提案した定点モニタリングサイトにおいて、環境省が行っている「モニタリングサイト1000事業」等との連携により、温暖化影響の評価の広報・普及に努める。

6. 研究者略歴

課題代表者：渡邊 剛

1970年生まれ、北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程修了、博士（地球環境科学）、現在、北海道大学大学院理学研究院講師

研究参画者

(1) : 渡邊 剛 (同上)

(2) : 杉原 薫

1971年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程中退、博士（理学）、現在、福岡大学理学部助教

(3) : 山野博哉

1970年生まれ、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士（理学）、国立環境研究所研究員、現在、国立環境研究所主任研究員

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) 山野博哉：沿岸海洋研究, 46, 3-9 (2008) 「日本におけるサンゴ礁の分布」
- 2) K. Hyeong, M. Shimamura, T. Watanabe, H. Yamano, K. Sugihara, and J. Kim: Ocean and Polar Research, 30, 351-359 (2008) “Evaluation of Jeju/Tsushima hermatypic corals as sea surface temperature (SST) recorders”
- 3) K. Shirai, T. Kawashima, K. Sowa, T. Watanabe, T. Nakamori, N. Takahata, H. Amakawa, and Y. Sano: Geochimica et Cosmochimica Acta, 72, 5386-5400 (2008) “Minor and trace element incorporation into branching coral *Acropora nobilis* skeleton”
- 4) 川島龍憲・渡邊 剛・白井厚太郎・前川 聡・入野智久・佐野有司：地球化学, 43, 35-42 (2009) 「酸素・炭素安定同位体比・Mn/Ca比を用いた石垣島ハマサンゴの壊死研究」
- 5) M. Shimamura, K. Hyeong, C.-M. Yoo, T. Watanabe, T. Irino, and H.-S. Jung: Geosciences Journal, 12, 1, 25-31 (2008) “High resolution stable isotope records of scleractinian corals near Ishigaki Island: Their implication as a potential paleoclimatic recorder in middle latitude regions”
- 6) 岨 康輝・渡邊 剛・鈴木徳行：地球化学, 42, 55-67 (2008) 「サンゴ骨格中の有機物分析による古環境解析の新展開」
- 7) 渡邊 剛・島村道代・山野博哉：日本サンゴ礁学会誌, 11:1-8 (2009) 「北限サンゴ礁から採取されたキクメイシ属サンゴ骨格中の酸素・炭素同位体比」
- 8) 山崎敦子・渡邊 剛・岨 康輝・中地シュウ・山野博哉・岩瀬文人：日本サンゴ礁学会誌, 11:1-17 (2009) 「高知県竜串湾に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた温帯域の古環境復元」
- 9) 杉原 薫・園田直樹・今福太郎・永田俊輔・指宿敏幸・山野博哉：日本サンゴ礁学会誌, 11, 51-67 (2009) 「九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴ群集の緯度変化」

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（社会科学系の課題のみ記載可）

なし

RF-082 北限域に分布する造礁サンゴを用いた温暖化とその影響の実態解明に関する研究

(1) 造礁サンゴ骨格を用いた温暖化とその影響の検出に関する研究

北海道大学

大学院理学研究院 自然史科学部門

渡邊 剛

〈研究協力者〉 北海道大学 大学院理学研究院 自然史科学部門 島村道代
 北海道大学 大学院理学研究院 自然史科学部門 中村隆志

平成20～21年度合計予算額 11,500千円
 (うち、平成21年度予算額 6,300千円)

※予算額は、間接経費を含む

[要旨] 造礁性サンゴ骨格を利用した過去の環境復元は熱帯～亜熱帯域に限られていた。一方で、地球温暖化や海洋酸性化による影響を最も受け易いと考えられる、日本沿岸を含む中緯度温帯域においては、季節～年程度の時間解像度を持つ記録媒体がないためその実体の把握が遅れているのが現状である。本研究では、日本周辺の温帯域の日本海側から2地点（長崎県壱岐と鹿児島県甬島）と太平洋側の2地点（和歌山県串本と高知県竜串）より100年から数100年間の期間を遡ることのできるサンゴコア試料をそれぞれ掘削することに成功した。これらの地点は共に、大型の造礁性サンゴの世界の北限域に位置しており、我が国の沿岸域における非常に貴重な温暖化履歴試料となり得る。本研究では、これらのサンゴコア試料について、酸素・炭素安定同位体比及び骨格成長量・密度・石灰化量を解析した。これらの結果、サンゴ骨格の酸素同位体比には水温と降水量、炭素同位体比には、日射量と化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度変動（温暖化による環境変動）、骨格成長量・密度・石灰化量には造礁性サンゴの成長の履歴（環境変動に対する応答）が記録されていることが明らかになった。過去100年間ににおけるこれらのサンゴコア（サンゴ年輪）記録には、温暖化傾向と化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度の増大の傾向が読み取れ、また、それに対するサンゴの成長の応答は、日本海側と太平洋側では異なることが明らかとなった。

[キーワード] 温帯域、サンゴ骨格、酸素・炭素同位体比、石灰化量、地球温暖化

1. はじめに

造礁サンゴは、代謝の変化、白化現象などを通じて水温上昇の影響を、また石灰化阻害により海洋酸性化の影響を受け、これらがサンゴ骨格の成長速度や密度の変化、微量金属元素・安定同位体比の変動という形で骨格に記録される。そのため骨格年輪を形成し、100年以上にわたり生存するものがある塊状のサンゴは、沿岸域において環境を長期かつ高時間分解能で復元できる唯一のアーカイブであると言える。またサンゴは熱帯から温帯まで広く分布するが、日本及び韓国などの温帯域は造礁サンゴ分布の北限にあたり、そこに分布するサンゴは環境の変化に対して非常に敏感に応答すると考えられる。しかしながらこれまで、サンゴ骨格を用いた環境復元は試料の採取が容易な熱帯域に限られ、分布・分類などの点において実態把握がなされてこなかった温帯域は研究空白地域として残されてき

た。このため温帯域に棲息するサンゴに関して、地球温暖化に伴う水温上昇と海洋酸性化の記録者としての評価を行い、これを用いて過去の環境を復元することで、温帯域における温暖化とその実体の解明を行うことができると考えられる。

2. 研究目的

本研究においては、過去100年間程度の温暖化履歴を持つ大型の造礁性サンゴ群体では世界の北限域に位置する日本周辺海域の日本海側（長崎県壱岐と鹿児島県甬島）と太平洋側（和歌山県串本と高知県竜串）からそれぞれ2地点で水中掘削によりサンゴコア試料を取得し、それらの酸素・炭素安定同位体比および石灰化量の解析から、温帯域における地球温暖化の実態とその影響を解明することを目的とした。

3. 研究方法

本サブテーマでは、事前調査やサブテーマ2および3からの情報により、日本周辺の日本海側では長崎県壱岐と鹿児島県甬島、太平洋側では、和歌山県串本と高知県竜串をそれぞれ調査地域とした（図1）。調査地域では、まず、ダイバーによる潜水調査により大型の造礁性サンゴを選定し、続いて、水中ボーリングにより直径5 cmのサンゴコア（柱状試料）を掘削し過去数百年間の記録を含む骨格試料を得た（図2）。また、先行する国際共同研究によって調査が行われていた日本海側の済州島（韓国）、対馬（長崎県）、五島列島（長崎県）、隠岐（島根県）の試料も比較・対象のため用いた（図1）。得られたサンゴ骨格試料は研究室に持ち帰り、厚さ5 mmの板状のスラブに切断した後に、軟エックス線写真を撮影し骨格に刻まれた年輪を観察した（図3）。さらに、年輪観察により明らかになる時代による成長構造に沿って時系列にマイクロリングを行う（図4）。これにより、時系列に沿った粉末状の試料が得られ下記のような化学組成の分析を行うことが可能となる。

サンゴ骨格中に含まれる微量金属と安定同位体比を測定することにより、骨格形成時の水温や塩分などの環境復元が可能である。水温変動はストロンチウム/カルシウム比¹⁾によって、また塩分変動は酸素同位体比とストロンチウム/カルシウム比を組み合わせ²⁾、酸性度を表すpHはボロンの安定同位体比³⁾をそれぞれ測定することにより復元することができる。また温暖化による水温上昇と海洋の酸性化は、サンゴ群体の成長速度と密度に影響を与えると予想され、これらを併せて評価することでより詳細な温暖化の影響評価が可能となる。しかしながら、温帯域においては、熱帯～亜熱帯域で一般的に使われているハマサンゴ⁴⁾が少ないため、他のサンゴを用いることを検討する必要がある。また温帯域のサンゴは、熱帯域のサンゴに比べて密度が小さくてもろいため、骨格からの微量元素と安定同位体比測定用サンプルの採取が困難であり、従来用いられてきた手法からの改良が必要となる（図3）。さらに、迅速・簡便に経年骨格密度を分析する、先端的な分析技術開発を推進した。

通常骨格年輪解析に用いられるハマサンゴに加えキクメイシやニホンアワサンゴなど、温帯域に多く分布する塊状のサンゴ⁵⁾を中心に試料を採取、塊状群体の最大成長軸方向に沿って骨格を板状に切った後、軟エックス線画像撮影により年輪の検出を行った（図2）。またこれにより年輪が検出されたサンゴ種に関してはサンゴ骨格の成長量や密度の違いと環境要因の関係を明らかにするため、骨格密度と成長速度の計測を行った。密度は軟エックス線写真の画像解析により、成長速度はエックス線写真に写る年輪により推定した。また、各サンゴ採取地点に水温計を設置すると共に、採水を行って微量金属と塩分・pHの測定を行った。骨格に含まれる安定同位体比・微量元素と環境要因との関係

を明らかにするためには、骨格年輪に沿った微量のサブサンプリングを行い、得られた粉末試料を分析に供する必要がある（図3）。しかし温帯域から得られるサンゴ骨格は、熱帯域のそれに比べ非常にもろいため、氷温室内で骨格試料を氷詰めにして固定し、氷ごと一定間隔で削り取る手法（フリージングマイクロトーム法⁶⁾）を用いた。得られた粉末試料は、ICP-AES（ICP発光分析法）を用いて骨格中のストロンチウム/カルシウム比⁷⁾を、同位体比質量分析計を用いて酸素同位体比⁸⁾の測定を行った。測定結果は水温などの環境データと比較、キャリブレーションを行った。

本サブテーマでは、壱岐・甕島・竜串・串本の各地点からサンゴボーリングによりコアを採取し、軟エックス線画像解析の結果、それぞれが100年以上の記録を保持していることが明らかになった（図5）。これらの酸素・炭素安定同位体比および石灰化量の解析を時系列に沿って行った。なお、当初予定していた徳島県牟岐町に生息している大型ハマサンゴ群体については、現地での調査に加えて講演会等の普及活動を行ったが（徳島新聞記事参照）、掘削するための地元の理解と協力体制が整わないと判断されたので、今回は掘削を見合わせた。しかし、地域住民や地元の自治体の理解と造礁性サンゴを用いた環境研究への興味は確実に高まっており、いずれ、掘削のための条件が整う可能性も高く、今後も継続して普及活動に努めたいと考えている。

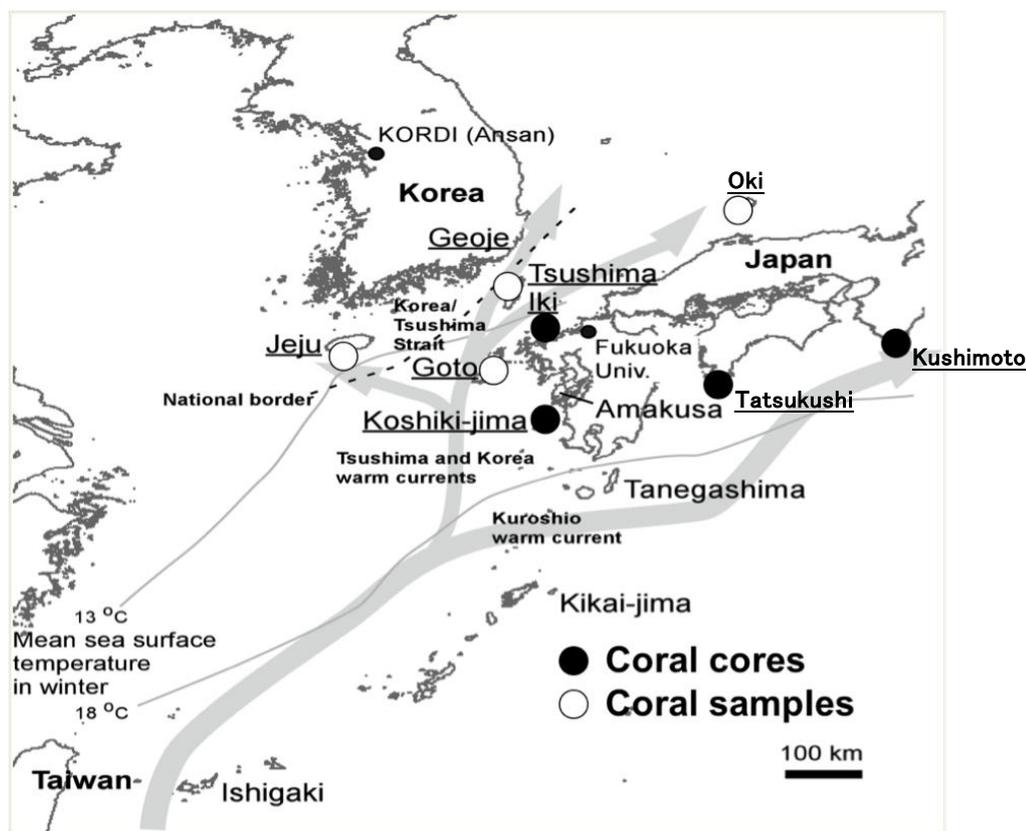


図1 研究調査地域

黒丸は、長尺サンゴコア取得地点、白丸は、サンゴ骨格試料採取地点

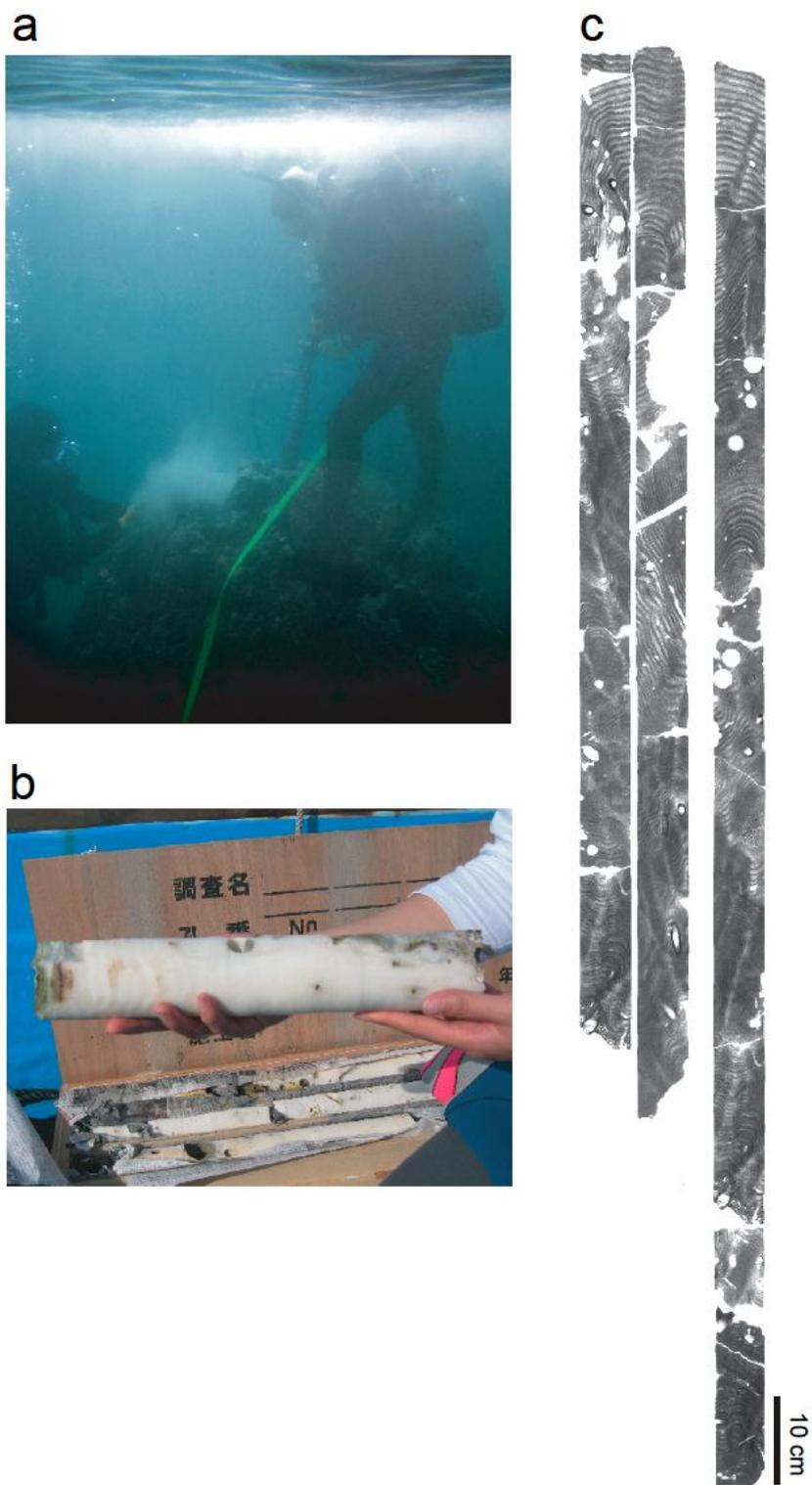


図2 サンゴコア掘削風景と採取されたサンゴコア

a) 大型の塊状サンゴ群体を水中で掘削する様子。写真中央下部がサンゴ群体。圧縮空気をを用いた専用ドリルで群体上部から下部に向けて垂直に掘っていく。b) 掘削で得られたサンゴコア。c) bなど得られたコア全体の軟エックス線写真。コア最上部は特にはっきりと年輪が確認できる（山崎他、2009）。

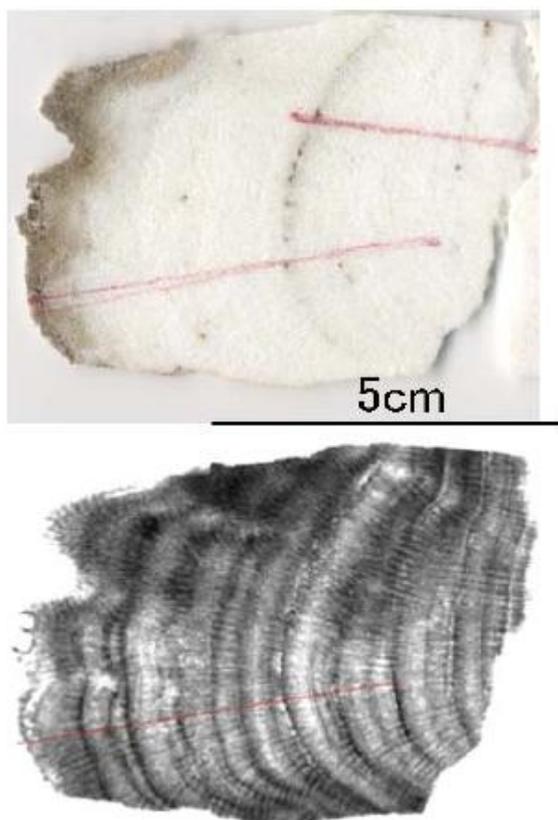


図3 軟エックス線画像による年輪検出（ハマサンゴの例）

上) 板状に加工したコア写真、下) その軟エックス線画像(ポジ)である。軟エックス線画像で黒く写っているところが密度の高い部分で、その季節変化が年輪となる

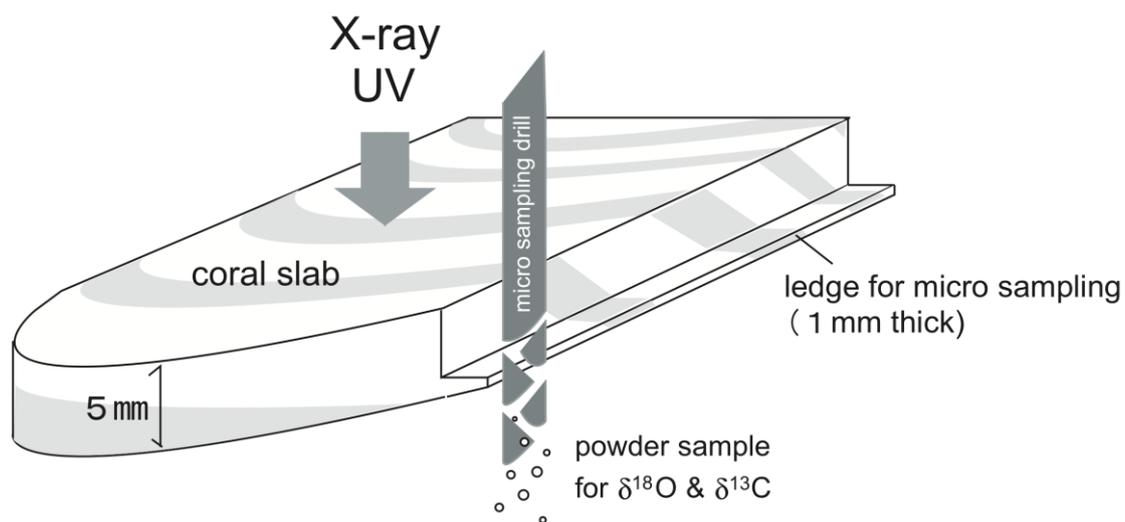


図4 サンゴ骨格試料の分析

成長方向と平行（骨格年輪と垂直）に、マイクロミリングにより数週間程度の時間分解能で同位体比測定用の粉末試料を作成する。

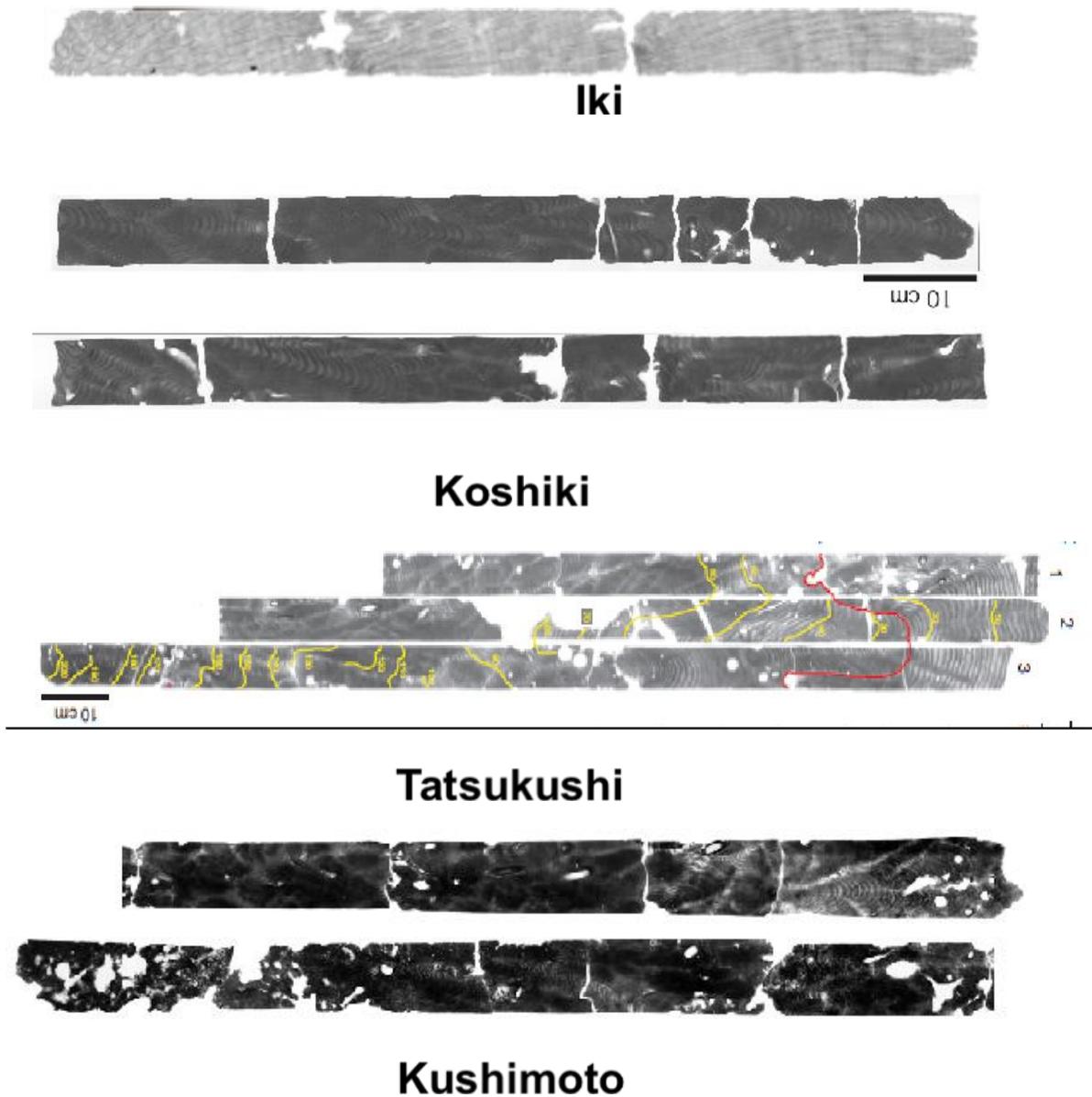


図5 長尺サンゴコアのエックス線画像

長崎県壱岐、鹿児島県甬島等試料の軟エックス線による年輪画像、それぞれに明瞭な年輪が観測され過去100年～数百年間の間の環境／生育記録を含む。

4. 結果・考察

1) 温帯域において年輪解析に利用可能なサンゴ種の検討

甬島・竜串・串本の各地点からは、熱帯域で従来使われてきたハマサンゴに加え、キクメイシを併せて採取、エックス線画像撮影を行った。また、対馬・済州島から得られたキクメイシ・ニホンアワサンゴ、壱岐で採取されたキクメイシについても同様に軟エックス線画像撮影を行い、年輪の検出を行った。その結果、いずれの地点から採取されたハマサンゴ・キクメイシ・ニホンアワサンゴ共に、年輪に相当すると考えられる成長輪が検出された。以上から、これらのサンゴ

種、特に従来用いられてこなかったキクメイシ・ニホンアワサンゴに関しては、ハマサンゴが生息しない地域でも採取が可能であることから、今後温帯域での環境復元に関して有力なアーカイブとなる可能性が示された。

2) サンゴ骨格の成長量や密度の違いと環境要因の関係

本項目の分析では、骨格密度分析過程での人為的影響を最小限に抑えるため、軟エックス線画像撮影過程にデジタル分析手法を取り入れた。また、それにもなう標準物質製作とデータ校正方法改良を大幅に進めた。これらの原データから最終的なデータを自動導出するためのプログラムを開発した。また、Cooper et al. (2008)⁹⁾が示した方法に従ってサンゴ骨格の年平均骨格密度・伸長量・石灰化量を算出するために軟エックス線画像を撮影し、それぞれ厚さの異なる10個の板状の*Hippopus hippopus* (Linnaeus 1758) 殻を、密度用標準試料 (2.850 ± 0.008 (1σ) g/cm^3) として用いた。また、データ校正のためにアルミニウムバーをサンゴ骨格スラブの縦横二方向に置いて撮影した。軟エックス線画像は、 0.10638 mm/pixelの解像度を伴ったグレースケール(0-255の256階調)に変換して分析を行った。(1)年間平均密度($\text{g CaCO}_3/\text{cm}^3$)は、隣接した最大密度部分間の平均密度として算出した。(2)年間成長量(mm/yr)は、隣接した最大密度部分間の距離とした。(3)石灰化量($\text{g CaCO}_3 \cdot \text{cm}^2/\text{yr}$)は、年間平均密度と年間成長量の積によって算出した(下記式)。

$$\text{石灰化量}(\text{g CaCO}_3 \cdot \text{cm}^2/\text{yr}) = \text{骨格密度}(\text{g CaCO}_3/\text{cm}^3) \times \text{年間伸長量}(\text{cm/yr})$$

なお、上記3つの項目は、2測線の平均値として求めた。測線幅は約3mmで、1つ目の測線は安定同位体比分析測線とし、2つ目の測線を1つ目の測線と同じ期間になるよう選び、骨格密度と年間伸長量を計測した。骨格伸長量と骨格密度の年平均値の相関を取ると負の相関を示し、他の先行研究(Scoffin et al. 1992¹⁰⁾; Lough and Barnes 1997¹¹⁾, 2000¹²⁾)と同様に骨格伸長量が低下するほど骨格密度は増大していることが明らかになった(図6a)。骨格伸長量の増大は骨格構造を密にすることよりも優先されると考えられる(Barnes and Lough 1993¹³⁾)。また骨格伸長量は石灰化量と正の相関を示すため(図6b)、骨格密度と石灰化量は負の相関を示す(図6c)。高水温時には低密度バンドが形成され、低水温時には高密度バンドが形成されるのは、骨格伸長の季節変化が骨格密度に現れるためだと考えられる。

成長量および石灰化量は、熱帯～亜熱帯域ハマサンゴから見積もられた成長量および石灰化量と生息域海水温との回帰直線(グレートバリアリーフに生息するハマサンゴより作成)上にプロットされたものの、骨格密度はその直線から大きく外れていた。また、亜熱帯に生息するサンゴと比較するため、石垣島(沖縄県)で採取されたサンゴを分析・対比を行った。その結果、温帯域に生息するハマサンゴの骨格密度(約 1.2 g/cm^3)は、石垣島のそれ(約 1.4 g/cm^3)よりも約15%低いことが判明した。

以上の結果は、温帯域と熱帯～亜熱帯域ではサンゴ骨格成長メカニズムが違うことを意味し、温暖化とそのサンゴへの影響を見積もるためには、温帯域に生息するサンゴ骨格成長に関して今後更なるデータの蓄積および検討が必要であることを示唆する。

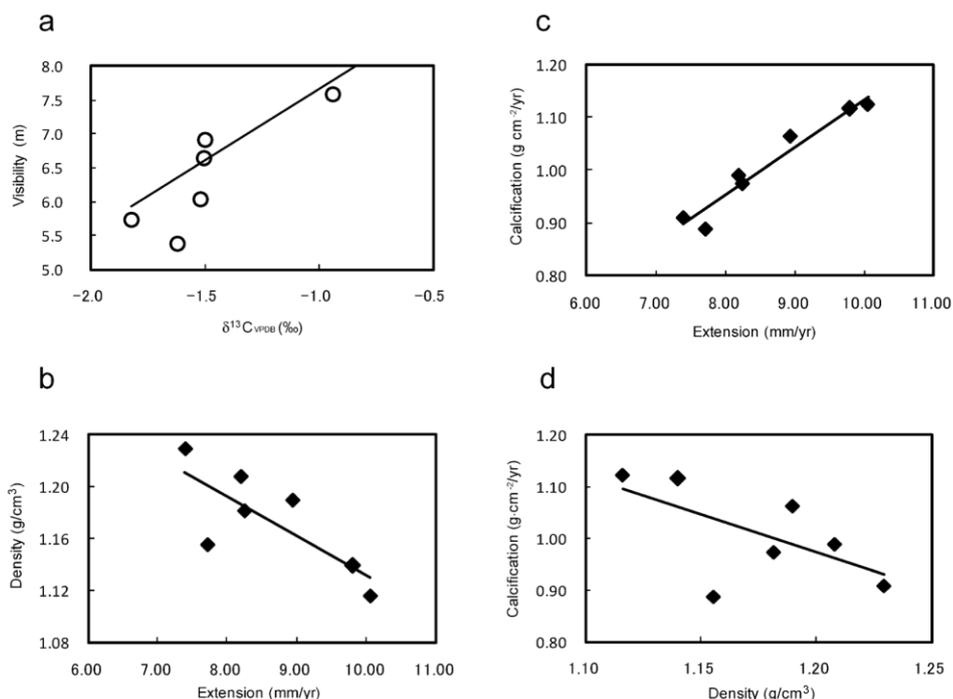


図6 高知県竜串湾のハマサンゴの骨格物理量の相関関係及び炭素同位体比と水中透視度の関係。
 a) 炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$) - 水中透視度 (Visibility), b) 骨格年間伸長量 (mm/yr) - 骨格密度 (g/cm^3), c) 骨格年間伸長量 (mm/yr) - 石灰化量 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{yr}$), d) 骨格密度 (g/cm^3) - 石灰化量 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}/\text{yr}$)。
 (山崎他、2009より引用)

3) 骨格に含まれる安定同位体比と環境要因との関係

ハマサンゴ (甌島・竜串)、キクメイシ (甌島・壱岐・対馬)、アワサンゴ (済州島) に関してサンゴ骨格試料の分析を行った。甌島のみ同一地点よりハマサンゴおよびキクメイシの採取が可能であったため、両種の酸素同位体比を測定し、同一環境に対する両種の応答を環境観測結果と併せて検証した (図7)。その結果、両種とも生息条件下における水温および塩分環境を反映した記録を有していることが確認された。しかし温度に対する骨格成長応答は両種で異なっており、ハマサンゴが夏季に大きな鉛直方向の成長を行うのに対して、キクメイシは冬季の成長が大きいことがわかった。このことから、キクメイシはハマサンゴよりも低水温に対して耐性があると考えられ、またハマサンゴの生息しない温帯域でキクメイシが生息している事実と一致する。さらに甌島よりも高緯度側であるため水温が低く、ハマサンゴの生息しない壱岐より採取されたキクメイシも、甌島キクメイシと同様に生息時の水温および塩分環境を反映した酸素同位体比変動を示していた (図8)。さらに対馬から採取されたキクメイシに関してストロンチウム/カルシウム比分析を行ったところ、水温に対応した変動を有していたことから、キクメイシの酸素同位体比および微量元素は温帯域における新たな環境アーカイブとして有効であると結論づけられる。

済州島から得られたアワサンゴに関しても、ストロンチウム/カルシウム比の分析を行い、水温に対応した変動を有していることが確認された。今後、酸素同位体比の分析が必要となるが、同種はキクメイシよりもさらに低水温域で生息可能であることから、環境記録者として一定の可能性が示された価値は非常に大きいと言える。

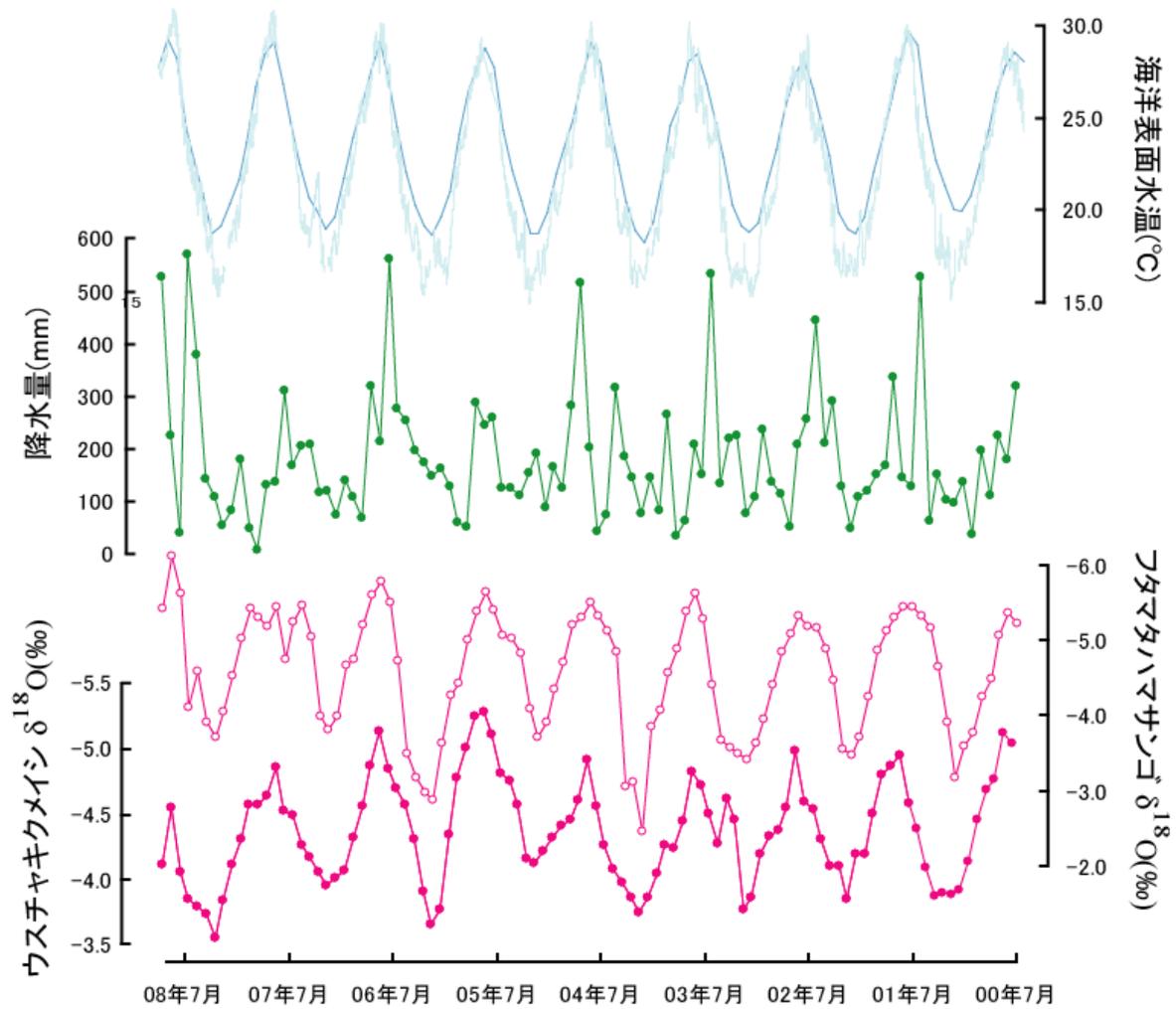


図7 鹿児島県甕島の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の変動。

サンゴ骨格中の $\delta^{18}\text{O}$ を決める要因は、海水自体の $\delta^{18}\text{O}$ と骨格形成時の海水温であるが、市の浦の海水中の $\delta^{18}\text{O}$ を左右する要因と考えられる降水量と、サンゴ骨格中の $\delta^{18}\text{O}$ に相関がみられないため、市の浦のサンゴ骨格中の $\delta^{18}\text{O}$ は骨格形成時の海水温によって決定されていると考えられる。海水温データはIGOSSによる甕島周辺の月平均海水温(太線)を使用し、参考として鹿児島県水産技術開発センター提供の甕島里におけるフェリーによる日々の実測値を細線で示した。また降水量は気象庁が公表している中甕観測所の観測データを使用した。

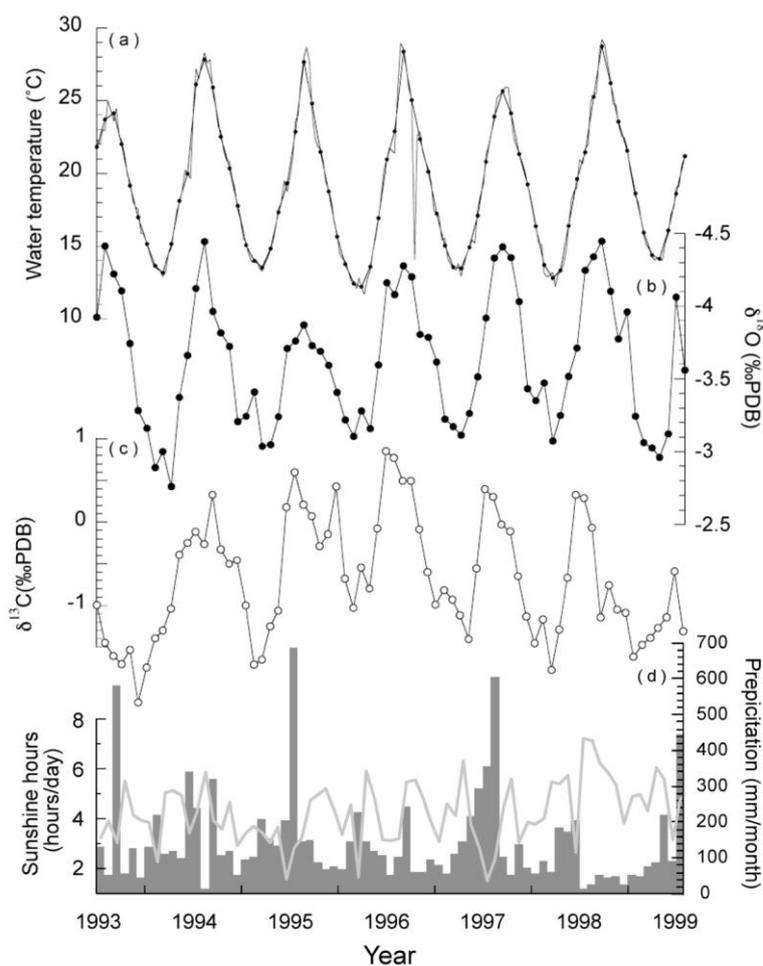


図8 長崎県壱岐のキクメイシ属の酸素・炭素安定同位体比, 水温, 降水量, 日照時間の比較。

(a) 観測された水温。黒丸のデータは月平均, 細線は 10 日平均を表す。(b) サンゴ骨格の $\delta^{18}\text{O}$ 。(c) サンゴ骨格の $\delta^{13}\text{C}$ 。(d) 観測された降水量(一月の積算量; 棒グラフ)と日照時間(月平均時間)。同位体比のデータは、酸素同位体比のそれぞれの年周期の極大値と極小値の骨格部位が、その年の最低水温時と最高水温時にそれぞれ形成されたものと仮定して時系列に変換した後に、1年間に12点(1点の持つ時間分解能が水温と同じ1ヶ月)となるように統計的にリサンプリングしたものである。(渡邊他、2009より引用)

4) 日本周辺海域から採取された長尺コアの酸素同位体比解析結果

日本周辺海域から採取された長尺コアの酸素同位体比解析結果では、日本海側の長崎県壱岐と鹿児島県甬島、太平洋側の高知県竜串と和歌山県串本で、それぞれの経年変化に酸素同位体比の減少の傾向が認められる(図9)。それぞれの季節変動と現場の水温を比較すると主な酸素同位体比の変動要因は水温であることがわかり(串本の最近の20年間分の季節変動が実測の水温に比べて小さいが、この原因については現在のところ不明である)、経年変化に見られる酸素同位体比の減少の傾向は、地球温暖化による水温上昇を記録していることがわかる。長尺コアの酸素同位体比に認められる温暖化の傾向とタイミングは、日本海側(壱岐と甬島)と太平洋側(串本と竜串)で、また、同じ海域でも緯度により(日本海側; 壱岐、太平側; 串本)異なることがわか

り、温暖化の影響は海域によりその影響の大きさもタイミングも違うことが予想される。これは、今後、他のデータとの比較検討を行うことにより、今後の温暖化予測のための基礎データとなると思われる。

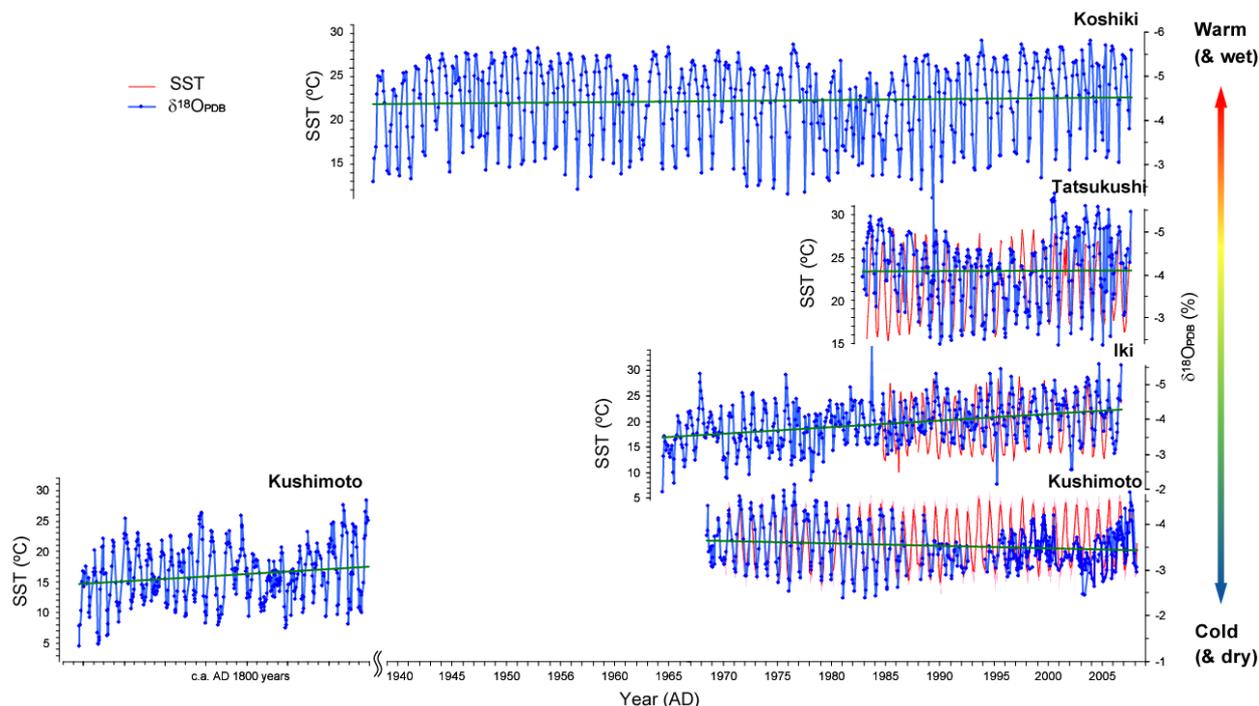


図9 日本周辺海域から採取された長尺コアの酸素同位体比解析結果

5) 日本周辺海域から採取された長尺コアの炭素安定同位体比解析結果

日本周辺海域から採取された長尺コアの炭素安定同位体比解析結果からは、日本海側の長崎県壱岐と鹿児島県甬島、太平洋側の高知県竜串と和歌山県串本で、それぞれの経年変化に明らかな減少傾向が認められる(図10)。これは産業革命以降の化石燃料の消費に伴い低い炭素同位体比の値を持った二酸化炭素が大気中に放出され続けた結果(スウス効果)が記録されていると思われる。ただし、串本サンゴの炭素安定同位体比は大きな経年変動については、成長速度による効果(年間に3mm程度の伸張量)と続成作用の効果を検討しなくてはならない。以上のことから、温帯域である日本周辺域のサンゴコアの炭素同位体比には、近年の二酸化炭素濃度の増大が記録されていることがわかり、他海域や地域の二酸化炭素の濃度の記録と比較することにより、今後の二酸化炭素濃度の上昇による中緯度域の応答が明らかになると思われる。

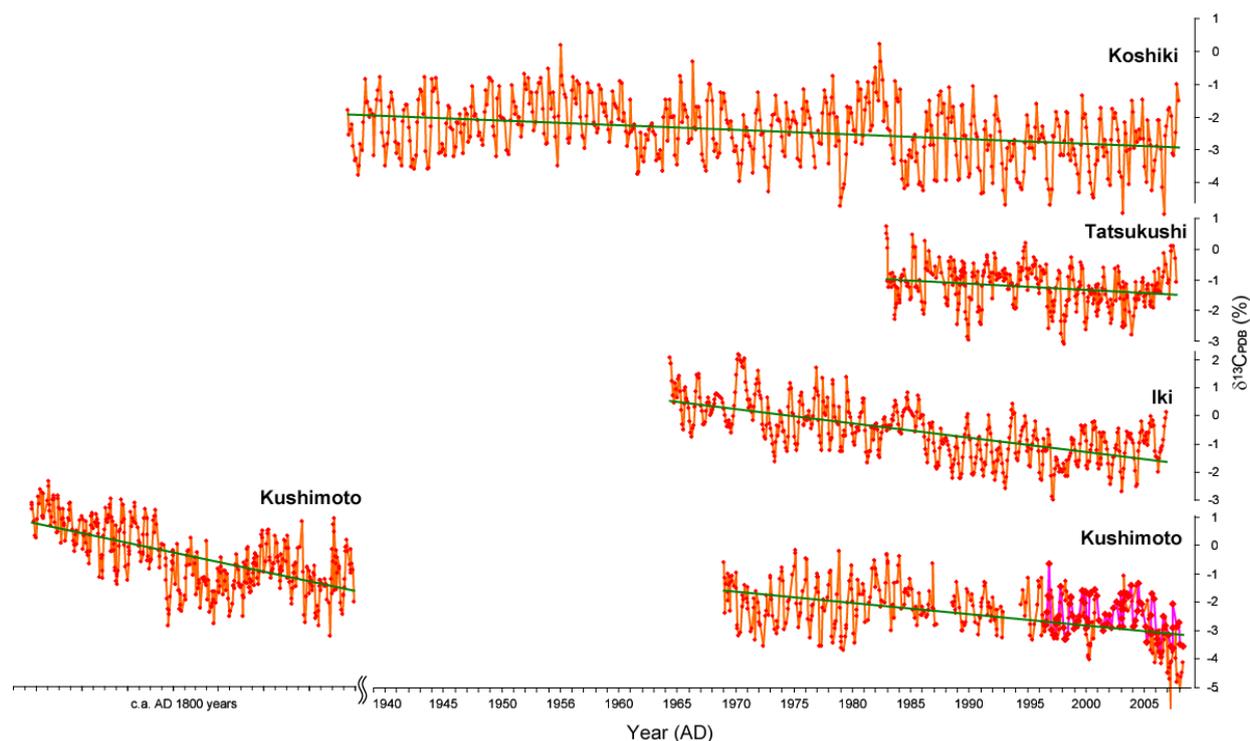


図 1.0 日本周辺海域から採取された長尺コアの炭素安定同位体比解析結果

6) 日本周辺海域から採取された長尺コアから検出された造礁性サンゴの石灰化量の変化

日本周辺海域から採取された長尺コアから解析された石灰化量の変化を日本海側（鹿児島県甬島）と太平洋側（和歌山県串本）で比較してみると両者には大きな傾向の違いがあることがわかる。日本海側は、現在に向けて石灰化量が減少しているのに対して、太平洋側では、逆に増大している（図 1.1）。上項に述べたように、地球温暖化の傾向や人為由来の二酸化炭素の増大が日本海側でも太平洋側でも認められるにも拘らず、両者における造礁性サンゴの石灰化量の変化に違いが見られるのは、用いたサンゴ種による差であるとする下記の仮説が成り立つ。日本海側では、同じハマサンゴ属でも温帯域に優先する *Porites heronensis* を使用したが、太平洋側では、熱帯域に優先する *Porites lutea* という種を使用した。日本海側では、現在よりも温暖化が進んでいない 1800 年代から 1900 年代までは、温帯域に卓越する *Porites heronensis* にとっては生育に適した環境であったために石灰化量は安定していたが、その後の温暖化や海洋酸性化の影響により石灰化量が減少した。一方で、太平洋側では、黒潮の影響により 1800 年代半ばには熱帯域に卓越する種である *Porites lutea* が生息していたものの生育状況としては好ましくなかったが、これが近年の温暖化による水温上昇により、より適した環境になり石灰化量が増大した。この結果は、サブテーマ 2 及び 3 により明らかになった、近年の温暖化に伴い熱帯域に特有のサンゴ群集が北上したとする結論と整合的である。

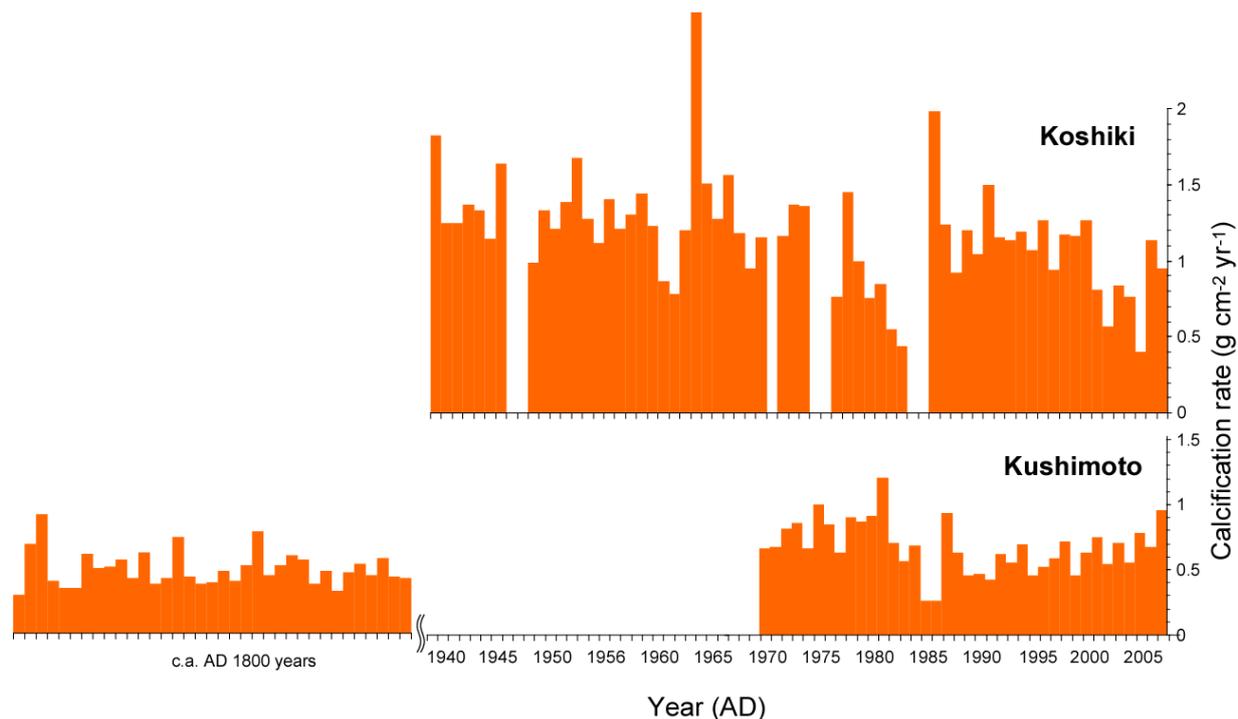


図 1.1 日本周辺海域から採取された長尺コアの石灰化量の変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

日本周辺の温帯域の日本海側から2地点(長崎県壱岐と鹿児島県甑島)と太平洋側の2地点(和歌山県串本と高知県竜串)より100年から数100年間の期間を遡ることのできるサンゴコア試料をそれぞれ掘削することに成功した。本研究では、これらのサンゴコア試料について、酸素・炭素安定同位体比及び骨格成長量・密度・石灰化量を解析した。これらの結果、サンゴ骨格の酸素同位体比には水温と降水量、炭素同位体比には、日射量と化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度変動(温暖化による環境変動)、骨格成長量・密度・石灰化量には造礁性サンゴの成長の履歴(環境変動に対する応答)が記録されていることが明らかになった。過去100年間におけるこれらのサンゴコア(サンゴ年輪)記録には、温暖化傾向と化石燃料由来の大気二酸化炭素濃度の増大の傾向が読み取れ、また、それに対するサンゴの成長の応答は、日本海側と太平洋側では異なることが明らかとなった。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究で得られたサンゴコア試料及びその記録は、大型の造礁性サンゴの世界の北限域に位置しており、我が国の沿岸域における非常に貴重な温暖化履歴となり得る。また、日本周辺海域における地球温暖化および二酸化炭素濃度の変動は、その実体の解明に役立つと共に、今後の対策を決定する上で貴重な判断材料を提供すると思われる。さらに、これらの温暖化や海洋酸性化に対する造礁性サンゴの応答履歴は、今後の生態系の推移の予測に資するものである。

6. 引用文献

- 1) T. Correge: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232, 408-428 (2006)

- “Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers”
- 2) M.K. Gagan, L.K. Ayliffe, D. Hopley, J.A. Cali, G.E. Mortimer, J. Chappell, M.T. McCulloch, M.J. Head: *Science*, 279, 1014-1018 (1998) “Temperature and surface-ocean water balance of Mid-Holocene tropical western Pacific”
 - 3) C. Pelejero, E. Calvo, M.T. McCulloch, J.F. Marshall, M.K. Gagan, J.M. Lough, B.N. Opdyke: *Science*, 309, 2204-2207 (2005) “Preindustrial to Modern Interdecadal Variability in Coral Reef pH”
 - 4) M. Shimamura, K. Hyeong, C.-M. Yoo, T. Watanabe, T. Irino, H.-S. Jung: *Geoscience Journal*, 12, 25-31 (2008) “High resolution stable isotope records of scleractinian corals near Ishigaki Island: Their implication as a potential paleoclimatic recorder in middle latitude regions”
 - 5) H. Yamano, K. Hori, M. Yamaguchi, O. Yamagawa, A. Ohmura: *Coral Reefs*, 20, 9-12 (2001) “Highest-latitude coral reef at Iki Island, Japan”
 - 6) T. Watanabe, T. Oba: *Journal of Geophysical Research*, 104, 20667-20674 (1999) “Daily reconstruction of water temperature from oxygen isotopic ratios of a modern *Tridacna* shell using freezing microtome sampling technique”
 - 7) D.P. Shrag: *Paleoceanography*, 14, 97-102 (1999) “Rapid analysis of high-precision Sr/Ca ratios in corals and other marine carbonates”
 - 8) M. Shimamura, T. Oba, G. Xu, B. Lu, L. Wang, M. Murayama, K. Toyoda, A. Winter: *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6: Q09017, doi:09010.01029/02005GC000966 (2005) “Fidelity of $\delta^{18}O$ as a proxy for sea surface temperature: Influence of variable coral growth rates on the coral *Porites lutea* from Hainan Island, China”
 - 9) T.F. Cooper, A.G. De'ath, K.E. Fabricius and J.M. Lough: *Global Change Biology* 14: 529-538 (2008) “Declining coral calcification in massive *Porites* in two nearshore regions of the northern Great Barrier Reef”
 - 10) T.P. Scoffin, A.W. Tudhope, B.E. Brown: *Coral Reefs*, 11, (1) 1-11 (1992) “Patterns and possible environmental controls of skeletogenesis of *Porites lutea*, South Thailand”
 - 11) J.M. Lough, D.J. Barnes: *Journal of Experimental marine Biology and Ecology*, 211, 29-67 (1997) “Several centuries of variation in skeletal extension, density and calcification in massive *Porites* colonies from the Great Barrier Reef: A proxy for seawater temperature and a background of variability against which to identify unnatural change”
 - 12) L.M. Lough, D.J. Barnes: *Journal of Experimental marine Biology and Ecology* 245, 225-243 (2000) “Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*”
 - 13) D.J. Barnes and R. B. Taylor: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 173, 123-131 (1993) “On corallites apparent in X-radiographs of skeletal slices of *Porites*”

7. 国際共同研究等の状況

日本学術振興会二国間交流事業（韓国との共同研究）及び日韓合同委員会の案件「日本及び韓国に分布する造礁サンゴによる環境変動解析」において、日本のサンゴ群集と韓国のサンゴ群集を比較し、共同で解析を行っている（カウンターパート：Kiseong Hyeong博士、韓国海洋研究院主任研究員）。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) K. Hyeong, M. Shimamura, T. Watanabe, H. Yamano, K. Sugihara, and J. Kim: *Ocean and Polar Research*, 30, 351-359 (2008) “Evaluation of Jeju/Tsushima hermatypic corals as sea surface temperature (SST) recorders”
- 2) K. Shirai, T. Kawashima, K. Sowa, T. Watanabe, T. Nakamori, N. Takahata, H. Amakawa, Sano, Y.: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 5386-5400. (2008) “Minor and trace element incorporation into branching coral *Acropora nobilis* skeleton”
- 3) 川島龍憲・渡邊 剛・白井厚太郎・前川 聡・入野智久・佐野有司: *地球化学*, 43, 35-45 (2009) 「酸素・炭素安定同位体比・Mn/Ca比を用いた石垣島ハマサンゴの壊死研究」
- 4) M. Shimamura, K. Hyeong, C.-M. Yoo, T. Watanabe, T. Irino, H.-S. Jung: *Geosciences Journal*, 12, 1, 25-31 (2008) “High resolution stable isotope records of scleractinian corals near Ishigaki Island: Their implication as a potential paleoclimatic recorder in middle latitude regions”
- 5) 岨 康輝・渡邊 剛・鈴木徳行: *地球化学*, 42, 55-67 (2008) 「サンゴ骨格中の有機物分析による古環境解析の新展開」
- 6) 渡邊 剛・島村道代・山野博哉: *日本サンゴ礁学会誌*, 11:1-8 (2009) 「北限サンゴ礁から採取されたキクメイシ属サンゴ骨格中の酸素・炭素同位体比」
- 7) 山崎敦子・渡邊 剛・岨 康輝・中地シュウ・山野博哉・岩瀬文人: *日本サンゴ礁学会誌*, 11:1-17 (2009) 「高知県竜串湾に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた温帯域の古環境復元」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 渡邊 剛: 平成20年度北海道大学公開講座テキスト「持続可能な社会と北海道発見-地球環境と私の暮らし」 pp37-41 (2008) 「サンゴ礁と地球環境変動」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) H. Yamano, K. Sugihara, T. Watanabe, M. Shimamura, and K. Hyeong: 11th International Coral Reef Symposium, Florida, USA (2008) “Reef building at high latitudes (34° N, Japan)”
- 2) 山野博哉・杉原 薫・渡邊 剛・島村道代・Kiseong Hyeong: 日本サンゴ礁学会第11回大会(ワークショップ)・静岡 (2008) 「地球温暖化に対する北限域の造礁サンゴの応答」
- 3) 渡邊 剛・岨 康輝・永田俊輔・杉原 薫・山野博哉: 日本サンゴ礁学会第11回大会・静

- 岡 (2008) 「北限域に分布する造礁サンゴを用いた骨格密度の季節～経年変動の復元」
- 4) 渡邊 剛：樹木年輪研究会招待講演・東京 (2008) 「サンゴ骨格を用いた環境解析の現状と展望」
 - 5) 渡邊 剛：牟岐千年サンゴの森シンポジウム招待講演・徳島 (2008) 「千年サンゴが語る地球環境変動」
 - 6) T. Watanabe, K. Sowa, T. Irino, M. Takasawa: International workshop on the Japan-Korea collaborative research on mid-latitude corals, Fukuoka, 17 March (2008) “Application of density profiles using X-ray photoanalysis to paleoenvironment reconstruction”
 - 7) 岨 康輝・山崎敦子・渡邊 剛：東京大学海洋研究所共同利用研究集会・バイオミネラリゼーションと石灰化- 遺伝子から地球環境まで 招待講演・東京 (2008) 「サンゴ骨格中の有機物を利用した古環境解析」
 - 8) 岨 康輝・渡邊 剛・坂本竜彦・飯島耕一・高沢昌芳・入野智久・Aguilar, Y. M.・加瀬友喜：日本地球化学会第55回年会・東京 (2008) 「軟エックス線写真・非破壊蛍光X線地殻コアロガー (TATSCAN) を利用した迅速なサンゴ骨格成長量・化学組成変動分析による古環境解析手法の開発」
 - 9) 山崎敦子・渡邊 剛・川島龍憲・小川奈々子・大河内直彦・白井厚太郎・佐野有司・植松光夫：日本地球化学会第55回年会・東京 (2008) 「サンゴ骨格に記録された窒素同位体比の季節変動：低緯度海洋表層における栄養塩指標としての可能性」
 - 10) 山崎敦子・渡邊 剛・白井厚太郎・小川奈々子・大河内直彦・植松光夫：日本サンゴ礁学会第11回大会・静岡 (2008) 「沖ノ鳥島の造礁性サンゴ骨格を用いた海洋表層の栄養塩環境の復元」
 - 11) 甕 聡子・永井隆哉・岨 康輝・渡邊 剛：日本サンゴ礁学会第11回大会・静岡 (2008) 「サンゴ骨格の微細構造観察」
 - 12) A. Yamazaki, T. Watanabe, T. Kawashima, N. Ohkouchi, N. Ogawa, M. Uematsu (2008) Seasonal variation of $\delta^{15}\text{N}$ in coral skeletons. 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale, Florida, (Poster presentation)
 - 13) 甕 聡子・永井隆哉・坂本直哉・岨 康輝・渡邊 剛・坂本尚義：日本鉱物科学会・秋田 (2008) 「サンゴ骨格の微細構造観察」 (ポスター発表)

(3) 出願特許

特に記述すべき事項なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

- 1) 平成20年地球環境革新型研究課題ワークショップ (平成20年 6月26日、札幌)
- 2) 古気候、古環境解析の地球化学 (平成20年 9月12日、東京)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 徳島新聞 (平成20年10月27日、添付記事参照)
- 2) 読売新聞 (平成21年 1月 8日、徳島版)

3) 朝日新聞 (平成21年 3月 1日、関西版)

牟岐のハマサンゴ テーマにシンポ

住民ら保護 熱く訴え

世界最大級と推測される牟岐大島のハマサンゴをテーマにした「牟岐千年サンゴの森シンポジウム」が二十七日、牟岐町川長の「海の総合文化センター」で開かれた。基調講演で、世界最長寿の可能性が指摘されたほか、意見発表では、地元中学生らが保護やPRに向けた熱意を飯泉審判知事にみせた。

専門家「世界最長寿」指摘も

基調講演したのは、サンゴを研究している北海道大学大学院理学研究院の渡邊剛講師。その中で、高さ八メートル以上の牟岐大島のハマサンゴは、世界最大とされる台湾のものに匹敵するとし、比較的、水温の低い高緯度の地域にこれほどの大型は奇跡的と指摘。低水温により成長が遅いことを考慮すれば千年ほど経過しているとして「世界最長寿かもしれない」と話した。

また、ハマサンゴを調査すれば過去千年間の周辺の海や地球環境の変化が分かる可能性があることから、学術調査の必要性も訴えた。

講演に続いて意見発表会があり、移動知事室で県南に滞在している飯泉知事や渡邊講師のほか、地元中学生二人と住民二人の計六人が参加。「貴重な千年サンゴを後世に残すため、できるだけ保護やPRに向けた熱意を語り合った。

飯泉知事も「千年サンゴの価値をみなさんと世界に広げていきたい」と述べた。

シンポジウムは、ハマサンゴで町おこしを目指している「牟岐千年サンゴの発掘隊」が開催した。

ハマサンゴの保護に向けた思いを語る中学生ら。牟岐町の海の総合文化センター



(6) その他

特に記述すべき事項なし

RF-082 北限域に分布する造礁サンゴを用いた温暖化とその影響の実態解明に関する研究

(2) 造礁サンゴの分類と群集に対する温暖化の影響評価に関する研究

福岡大学理学部 地球圏科学科 地学分野

杉原 薫

<研究協力者> 福岡大学理学部 地球圏科学科 園田直樹・今福太郎
 福岡大学大学院 理学研究科 永田俊輔・指宿敏幸
 京都大学 瀬戸フィールド科学教育研究センター 深見裕伸

平成20～21年度合計予算額 3,250千円
 (うち、平成21年度予算額 1,300千円)

※予算額は、間接経費を含む

[要旨]高緯度域の造礁サンゴ群集は、地球温暖化による表層海水温の上昇や海洋酸性化といった地球規模での攪乱の影響指標として、現在注目されつつある。そこで本研究では、高緯度域の造礁サンゴに関する基礎データを収集することを目的として、鹿児島県甬島列島から島根県隠岐諸島にかけてみられる造礁サンゴの生息環境と群集構造の定量調査を2003年から2009年にかけて行った。その結果、生息種数と被覆率がともに高い造礁サンゴ群集は、どの海域でも波浪エネルギーが中程度で濁度が小さいと推定される地点（外洋に近い島陰あるいはやや遮蔽的な湾口）の水深10m以浅で多くみられた。また、これらの生息範囲は、緯度の増加に伴ってより波浪の影響の少ない内湾の浅海域あるいは外洋に近くても水深の深い環境へと局所化する傾向が認められた。甬島列島上甬島でみられた造礁サンゴ群集の優占種は、亜熱帯性の卓状・枝状 *Acropora* (*A. hyacinthus*や*A. muricata*) と板状の*Pavona decussata*であった。長崎県五島列島の福江島と若松島では、外洋側で温帯性の卓状 *Acropora* (*A. glauca*, *A. japonica*や*A. solitaryensis*) が、内湾側で被覆状～塊状種 (*Leptastrea pruinosa*, *Mycodium elephantotus*や*Hydnophora exesa*など) と温帯性の枝状 *Acropora* (*A. tumida*や*A. pruinosa*) がそれぞれ卓越していた。長崎県壱岐と対馬では、温帯性の卓状 *Acropora*種は全くみられず、塊状の*Favia* spp. と葉状～被覆状種 (*Echinophyllia* spp. や*Lithophyllon undulatum*など) が大部分を占めていた。隠岐諸島では、塊状～被覆状の*Oulastrea crispata*, *Alveopora japonica*と*Psammocora profundacella*の生息が確認されたのみで、これらの種は生息群体数も少なく散在的な分布を示す群集（個体群）を構成するに過ぎなかった。

[キーワード] 高緯度域、造礁サンゴ群集、緯度変化、保全、モニタリング

1. はじめに

日本列島は、世界の造礁サンゴの分布域の中で高緯度に位置しているにもかかわらず、琉球列島西岸から本州南岸に沿って北上する黒潮（図 1a）の影響により、種多様性の高い造礁サンゴ相をもっている¹⁾。日本の造礁サンゴ相は、日本列島が北西太平洋における造礁サンゴの生息北限域

に位置していること、亜熱帯性と温帯性（沖縄型と南日本沿岸型²⁾）の造礁サンゴ群集によって構成されていること、そしてこれらの群集には多くの固有種や地理的亜種が含まれることから、生物学的・古生物学的に非常に重要である^{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8)}。さらに、日本はサンゴ礁形成の北限域に位置しており、それらを形成する造礁サンゴやその化石は地理学的・地質学的にも学術的価値が高い^{3, 9, 10)}。日本の造礁サンゴの分布域は、各海域における造礁サンゴ相の種多様性の違いをもとに、サンゴ礁域（八重山～奄美）・非サンゴ礁域（種子島～串本）・縁辺域（伊豆～館山）の3つに細分されている^{1, 11)}。また、それらの種多様性は緯度の増加に伴って減少すること、この減少には黒潮の北上に伴う表層海水温の低下が密接に関連していることが知られている¹¹⁾。このように、緯度的に広範囲に連なる日本列島は、緯度変化に伴う造礁サンゴ相やサンゴ礁地形の変化とそれらを規制する要因を解明するという点において、グレートバリアリーフを含むオーストラリア東岸^{6, 12, 13)}と同様に優れた地理的背景をもっている。

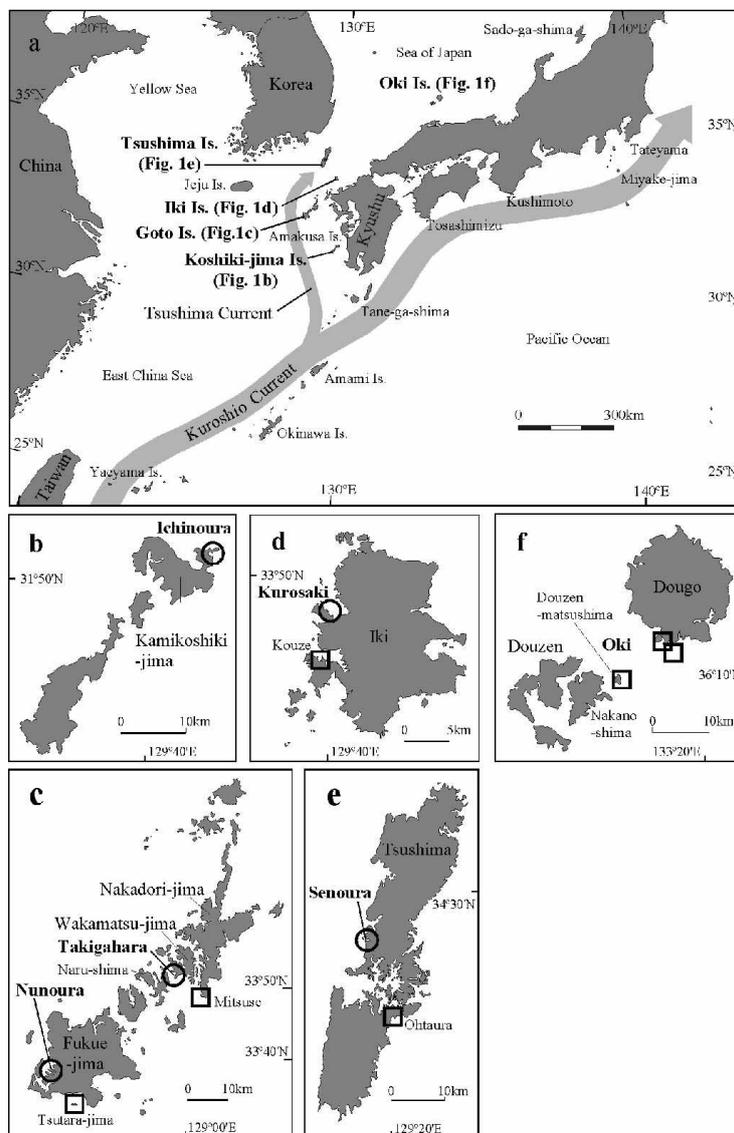


図1 (a) 調査地域の位置図. (b) 上甕島、(c) 福江島・若松島、(d) 壱岐、(e) 対馬、(f) 隠岐諸島の位置図中の○印は、本研究の中でライトランゼクト法による造礁サンゴの定量調査が行われた地点を示し、□印は目視によって定性的に調査を行った地点を示す。

日本列島の中でも非サンゴ礁域から縁辺域を含む本土沿岸（以下、高緯度域とよぶ）では、過去100年間に於いて顕著な平均表層海水温の上昇が認められている¹⁴⁾。近年これらの海域では、サンゴ礁域と同様に、造礁サンゴの白化現象やオニヒトデ・サンゴ食巻貝による造礁サンゴの食害が確認されている¹⁵⁾。同時に、亜熱帯性の造礁サンゴ種の分布域の北上や生息地の拡大も報告されている^{16, 17)}。これらのことから、高緯度域に生息する造礁サンゴの減少、沿岸生態系の劣化や衰退が危惧されるとともに、今後の急速な沿岸生態系の変化とそのモニタリングの重要性が指摘されている¹⁾。その一方で、高緯度域の造礁サンゴは、地球温暖化による表層海水温の上昇や海洋酸性化といった地球規模での攪乱の影響指標として現在注目されつつある¹⁰⁾。今後、これらの学術的価値やそれらの保全・モニタリングを検討するためにも、早急に高緯度域の造礁サンゴに関する基礎データを収集し、その特徴を把握しておくことが必要である。

日本の造礁サンゴ相を構成する造礁サンゴ群集の生息環境、内部構造とその動態に関する生態学的研究は、沖縄県石垣島^{18, 19)}、鹿児島県種子島²⁰⁾、高知県南部²¹⁾、和歌山県串本^{22, 23)}、東京都三宅島²⁴⁾や小笠原諸島²⁵⁾、そして千葉県館山²⁶⁾といった太平洋沿岸、すなわち琉球列島から本州南岸にかけての黒潮沿岸域で主に行われている（図1a）。いっぽう、黒潮の支流と考えられている対馬海流沿岸域を含む海域での同様の研究は、熊本県天草諸島^{7, 16, 27, 28)}、長崎県壱岐と対馬^{29, 30)}そして島根県隠岐諸島³¹⁾を除くとほとんど行われていない。

2. 研究目的

本研究では、日本の中でも特に過去の研究例が少ない九州西岸から日本海沿岸にかけて生息する造礁サンゴの生息環境や群集構造を緯度ごとに定量的に記載し、海域ごとのそれらの特徴を明らかにすることを目的とした。また、緯度の増加、すなわち表層海水温の低下とともに、高緯度域の造礁サンゴ群集がどのように変化するかを考察した。

3. 研究方法

調査は、北緯32°-36°に位置する鹿児島県甕島列島北部の上甕島、長崎県五島列島南部の福江島および津多羅島と中部の若松島および中通島、同県北部の壱岐と対馬、そして島根県隠岐諸島の島前中ノ島と島後で行われた（図1a）。調査期間は、上甕島が2007年と2008年の9月、福江島と津多羅島が2004年と2008年の9月、若松島と中通島がともに2008年10月、壱岐が2003年8-9月、2008年10月と2009年6月、対馬が2002年12月、2004年7月と2008年10-11月、島前中ノ島と島後がともに2008年8月に行われた。調査地点を選定するにあたり、まず地元の漁師・水産養殖業者・スキューバダイビング業者への造礁サンゴの生息地点に関する聞き取り調査を行った。次に、それらの結果、地形図ならびに過去の学術調査結果^{15, 29, 30, 31, 32, 33)}をもとに、全候補地点でシュノーケリングによる目視観察を行い、その中で最も造礁サンゴの出現種数と被覆率が高いと考えられた地点を各調査地域での調査地点とした。その結果、鹿児島県上甕島では北東部に位置する市ノ浦（北緯31°51'54.4"、東経129°55'38.8"）、長崎県福江島では南西部の布浦（北緯32°39'29.3"、東経128°39'37.1"）、同県若松島では南西部の滝ヶ原（北緯32°52'19.0"、東経128°58'41.7"）、同県壱岐では中西部の黒崎（北緯33°48'02.5"、東経129°40'02.9"）、そして同県対馬では中西部の瀬ノ浦（北緯34°24'51.7"、東経129°16'39.2"）の水深10m以浅の範囲で定量調査が行われた（図1b-1e）。よって本研究では、これらの地点の水深10m以深の範囲については調査されていない。また、島根

県島前中ノ島では沖合に浮かぶ島前松島東部沿岸(北緯36°06'01.1-26.4"、東経133°10'1.67-2.93")が、島後では南西部沿岸(北緯36°09'21.3-32.5"、東経133°14'53.8-15°57.3")が選定され、それぞれ水深20m以浅の範囲で調査が行われた(図1f)。しかし、これらの2地点では造礁サンゴの生息域がまばらで生息群体数も非常に少なかったため、調査は生息種の確認とそれらの生息環境の記録だけにとどまった。また、長崎県福江島南部の津多羅島北岸(北緯32°34'46.4"、東経128°43'31.2")、同県若松島に隣接する中通島南端の三ツ瀬(北緯32°49'12.2"、東経129°02'52.5")、同県壱岐中西部の神瀬(北緯33°46'09.0"、東経129°39'17.3")および同県対馬中東部の太田浦(北緯34°16'26.6"、東経129°19'58.5")の4地点(図1c-1e)では、環境省モニタリングサイト1000事業に関連して目視観察による造礁サンゴの被度変遷の長期モニタリングが行われている。これらの結果の一部^{15, 杉原 未発表})が、本研究で各海域を代表する造礁サンゴ群集の特徴を考察する際に用いられた。

各海域での定量および定性調査は、シュノーケリングおよびスキューバダイビングによって行われた。鹿児島県上甕島市ノ浦と長崎県福江島布浦・若松島滝ヶ原・壱岐黒崎・対馬瀬ノ浦では、まず海岸線に対して垂直方向に、海浜を0mとしてブイをつけたブロックを50m間隔で設置し、それらの間を巻尺で連結することで調査基線を設置した。次に、その基線上でシュノーケリングを行いながら、先端におもりをつけた巻尺で海面から海底までの水深を1mごと(壱岐黒崎では2mごと²⁹⁾)に計測し、その時の計測時間を記録した。それと同時に、基線上の定点でも5分ごとの水深計測と計測時刻の記録を同様に行い、調査地点でのローカルな潮位変化を記録した。これらのデータと潮位表をもとに計測水深を補正することにより、基線に沿った地形断面図を作成した。これらの計測は、どの地点でも波の高さが1m未満の好天日に行われたが、得られた水深データにはわずかな波浪による海面の揺らぎや、水中での巻尺のたわみによる若干の誤差が含まれると考えられる。

基線の設置後、ライントランゼクト法を用いて、各調査地点に生息する造礁サンゴ群集の定量記載を行った。基線に直交する長さ10mの測線(ライントランゼクト)が、市ノ浦では海岸から10m間隔、布浦、滝ヶ原と黒崎では5m間隔、瀬ノ浦では4m間隔でそれぞれ設置された。次に、測線直下にみられた造礁サンゴを同定し、測線と交差した部分の生サンゴ群体の長さを記録した。そして、測線10mに対する各造礁サンゴ種の交差部分の長さの割合をそれぞれの種の被覆率として算出した。なお、黒崎と瀬ノ浦の造礁サンゴ群集の調査結果については著者らが行った過去の研究^{29, 30)}に一部掲載されている。

造礁サンゴの同定は、過去の分類学的研究^{34, 35, 36)}に従って種レベルで行われた。水中での種同定が困難だったものについては、群体の一部を鑿とハンマーを用いて同定に必要な最小限量を採取し、ルーペと双眼実体顕微鏡による骨格形態観察を行うことで同定した。ただし、同定された種の中には、骨格形態のさらなる観察や分子系統解析によって同定の再検討を行う必要がある⁸⁾と思われる種も含まれている。

4. 結果・考察

鹿児島県上甕島市ノ浦は、湾口を南東側にもつ水深10m程度の湾で、湾の東方に長く張り出した岬によって、やや遮蔽的な環境となっている(図1b)。その沿岸部には、古第三系上甕島層群の

堆積岩（主に砂岩が卓越）が広く露出する³⁷⁾。長さ120mの調査基線が、造礁サンゴが多くみられた湾の東岸から中央部にかけての水深0-6mの範囲に設置された。基線に直交して10m間隔で設置された計13本の測線上では、10科18属32種の造礁サンゴが確認された（表1）。造礁サンゴは、海岸から30-110mの範囲（水深1-6m）に露出する砂岩やそれら起源の巨礫上でみられ、湾中央部（海岸から120m地点以降）に広がる未固結の砂泥上ではほとんどみられなかった（図2a）。造礁サンゴ群集の全被覆率は平均34.3%（最大74.6%）で、海岸から60m地点（水深約2m）と100m地点（水深約4m）で高く、100m地点より沖側では減少した。全出現種数は平均4.5種で（最大11種）で、海岸から60m地点で少し高くなるものの、海岸から100m地点にかけて次第に増加し、その後急激に減少した。優占種は、被覆率の高い順に卓状の*Acropora hyacinthus*、板状の*Pavona decussata*、枝状の*Acropora muricata*であった。これらの種は全調査範囲を通してみられたが、特に*A. hyacinthus*は海岸から30-60mの範囲（水深1-2m）、*P. decussata*は海岸から60-80mの範囲（水深2-4m）、*A. muricata*は海岸から80-110mの範囲（水深3-5m）でそれぞれ被覆率が高かった（図2a）。海岸から30-60mの範囲では、*A. hyacinthus*の他に同じく卓状の*Acropora glauca*や*Acropora japonica*が顕著にみられた。さらに、海岸から60-110mの水深2-5mの範囲では*Favia* spp. や*Cyphastrea* spp. といった塊状～被覆状のFaviidsが、海岸から90-110mの水深3-5mの範囲では*Echinophyllia* spp. などのPectiniidsがそれぞれ顕著にみられた。

表1 各調査地点で記録された造礁サンゴの相対被覆率。‘+’は、定量データはないがその種の生息が確認されたことを示す。なお、天草海域については過去の研究結果^{7, 16, 27)}を参考に見積もったものである。

Taxa	Study site						
	Kamikoshiki Ichinoura	Fukue Nunoura	Wakamatsu Takigahara	Iki Kurosaki	Tsushima Senoura	Oki	
Astreocoeniidae	<i>Stylocoeniella guentheri</i>	1.9	0.3				
Pocilloporidae	<i>Pocillopora danicomis</i>	1.2					
Acroporidae	<i>Montipora millepora</i>		0.5				
	<i>Montipora peltiformis</i>	0.4					
	<i>Acropora muricata</i>	13.2					
	<i>Acropora glauca</i>	0.5		9.1			
	<i>Acropora hyacinthus</i>	30.8					
	<i>Acropora japonica</i>	5.3					
	<i>Acropora loripes</i>	0.4					
	<i>Acropora pruinosa</i>			5.1			
	<i>Acropora solitaryensis</i>		0.7				
	<i>Acropora tumida</i>		8.1				
Poritidae	<i>Porites heronensis</i>		0.5				
	<i>Porites lichen</i>		1.4				
	<i>Goniopora djiboutiensis</i>		0.7				
	<i>Goniopora stokesi</i>			1.2			
Siderastreidae	<i>Alveopora japonica</i>		0.9			+	
	<i>Psammocora profundacella</i>					+	
Agariciidae	<i>Psammocora superficialis</i>	0.2					
	<i>Favona decussata</i>	25.9					
Fungiidae	<i>Favona varians</i>		0.6				
	<i>Lithophyllon lobata</i>				0.6		
Pectiniidae	<i>Lithophyllon undulatum</i>		2.2	16.7	14.2		
	<i>Echinophyllia aspera</i>	1.3	2.2	1.9	3.4		
	<i>Echinophyllia echinata</i>	1.1		3.1	23.5	43.4	
	<i>Echinophyllia patula</i>			5.6			
	<i>Mycedium elephantotus</i>			15.6			
Mussidae	<i>Pectinia ayleni</i>			1.3			
	<i>Acanthastrea hemprichii</i>	1.7					
	<i>Acanthastrea lordhowensis</i>			0.9			
Merulinidae	<i>Micromussa amakusensis</i>		0.3				
	<i>Hydnophora bonsai</i>		0.9				
Faviidae	<i>Hydnophora exesa</i>	1.6	21.6	12.0	1.6		
	<i>Caulastrea tumida</i>				0.6	7.3	
	<i>Favia javus</i>			1.4	0.2		
	<i>Favia lizardensis</i>	0.1	1.0	5.1			
	<i>Favia speciosa</i>	2.6	3.8	1.5	51.9	30.8	
	<i>Favia pallida</i>			2.8			
	<i>Favia rotumana</i>					0.5	
	<i>Favites abdita</i>	0.2					
	<i>Favites complanata</i>	0.2		1.2			
	<i>Favites russelli</i>	0.2	9.1	2.3			
	<i>Goniastrea aspera</i>	1.4		1.8			
	<i>Goniastrea australensis</i>	0.6		2.7			
	<i>Goniastrea deformis</i>		0.8				
	<i>Platygira contorta</i>	1.5	1.8	3.9			
	<i>Platygira daedalea</i>		0.3				
	<i>Oulastrea crispata</i>		0.2			3.4	+
	<i>Montastrea curta</i>	0.4					
	<i>Montastrea valenciennesi</i>	1.4		2.7			
	<i>Leptastrea pruinosa</i>	0.4	36.8	0.7	0.3		
	<i>Leptastrea purpurea</i>		1.2	0.9			
<i>Cyphastrea chalcidicum</i>	0.6	5.7					
<i>Cyphastrea japonica</i>	1.6	3.0	0.7	1.1			
<i>Cyphastrea microphthalma</i>	0.8		0.2				
<i>Cyphastrea serailia</i>	0.1	1.9	11.0				
Caryophylliidae	<i>Euphyllia ancora</i>	1.3					
Dendrophylliidae	<i>Turbinaria frondens</i>	0.9					
Total number of species		32	19	31	10	7	3

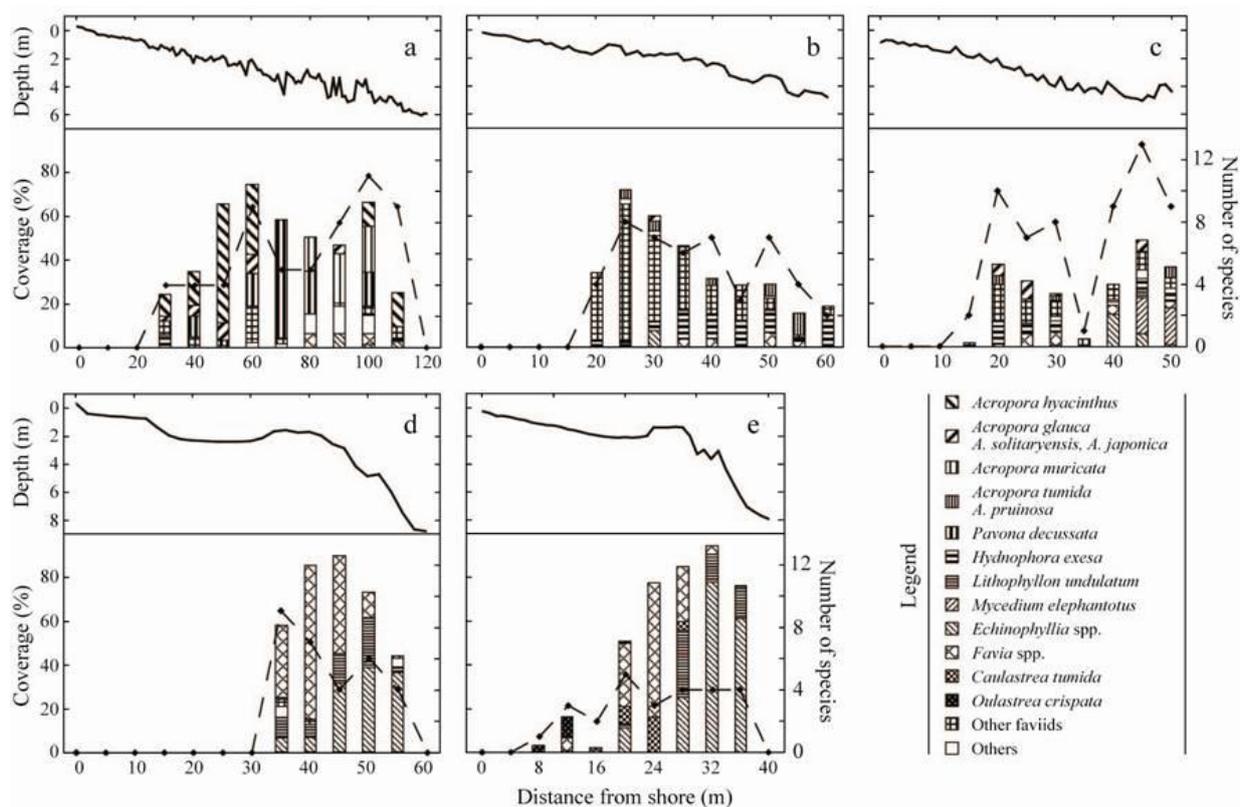


図2 調査地点における地形断面図（実線）および造礁サンゴの被覆率（縦棒）と種数（破線）

長崎県福江島布浦は、西北西に湾口をもつ細長い湾で（図1c）、沿岸から浅海部にかけて砂岩や泥岩からなる新第三系五島層群が広く露出する³⁸⁾。造礁サンゴは、湾口からやや入った北岸に沿って多くみられた。ここでは、水深0-5mの範囲を含む長さ60mの基線がほぼ南方の湾中央部に向かって設置された。5m間隔で設置された計13本の測線上では、7科13属19種の造礁サンゴが記録された（表1）。造礁サンゴは、海岸から20m地点付近（水深約1.5m）から生息しており、海岸から60m地点付近（水深約5m）を越えて底質が岩盤から未固結の砂泥に変わると、造礁サンゴは生息していなかった（図2b）。造礁サンゴ群集の全被覆率は平均25.7%（最大70.8%）で、海岸から25m地点（水深1.7m）まで急激に増加し、そこから60m地点（水深4.8m）まで緩やかに減少した。全出現種数は平均3.7種（最大8種）で、全被覆率と同様に海岸から25m地点で最大となり、その後沖側に向かって減少した。調査範囲内では、海岸から20-60m（水深1.5-5m）の範囲で*Hydnophora exesa*や*Leptastrea pruinosa*、*Favites russelli*や*Cyphastrea* spp. といった被覆状～塊状のFaviidsが優占し、枝状の*Acropora tumida*が随伴してみられた（図2b）。また、海岸から25m付近（水深1.5-2m）の岩盤上では*Oulastrea crispata*の小群体が顕著にみられ、海岸から30m地点付近（水深約2m）では卓状の*Acropora solitaryensis*や葉状～被覆状の*Echinophyllia aspera*の小群体が散在的にみられた。

長崎県若松島滝ヶ原は、隣接する奈留島によって島陰となっているが、南西に湾口をもつやや潮通しのよい湾である（図1c）。調査地点を含むこの湾の西岸には、新第三系五島層群道土井層の砂岩・泥岩互層が露出する³⁹⁾。造礁サンゴは、これらの岩石が露出する水深1-5mの範囲で多くみられた（図2c）。この範囲に、長さ50mの基線と5m間隔で計11本の測線が設置された。測線上で

は7科18属31種の造礁サンゴが記録された(表1)。これらの全被覆率は平均19.5%で、海岸から20m地点(水深2.1m)にかけて増加し、そこから35m地点(水深4.4m)までは減少するものの、調査範囲内で最大の93.9%をとる45m地点(水深5.0m)まで再び増加し、その後また減少した。全出現種数は平均5.4種(最大13種)で、全被覆率と同様に海岸から20m地点と45m地点で高い値を示した。滝ヶ原での優占種は、葉状～被覆状の*Mycedium elephantotus*、被覆状～塊状の*Hydnophora exesa*や*Cyphastrea serailia*、そして卓状の*Acropora glauca*であった(図2c)。また随伴種として、海岸から15-40m付近の水深2-5mの範囲では塊状～被覆状のFaviids(*Favia* spp.、*Favites* spp.や*Goniastrea* spp.)や枝状の*Acropora pruinosa*が、海岸から40m地点以降(水深4-5m)では枝状の*A. pruinosa*、葉状～被覆状の*Echinophyllia* spp.や*Alveopora japonica*がそれぞれみられた。さらに*Alveopora japonica*は、他種が生息していない調査地点より北側の湾奥部に相当する水深2-3mの範囲でもみられた。

長崎県壱岐黒崎は、北西に湾口をもつ湯本湾中部の南岸に位置する(図1d)。ここでは、砂岩や泥岩からなる新第三系勝本層群とそれを覆う玄武岩質溶岩が露出する⁴⁰⁾。造礁サンゴは、主として10m以浅に露出するこれらの岩盤や巨礫上で生息している²⁹⁾。黒崎には、北西太平洋で最北限に位置するサンゴ礁地形が発達しており^{9, 41)}、一般的なサンゴ礁域のサンゴ礁が主に卓状の*Acropora*で形成されているのに対し、これらは主に塊状の*Favia*や葉状の*Echinophyllia*で形成されていることが明らかになっている。このサンゴ礁上(図2d)に設置された長さ60mの基線と11本の測線上では、4科7属10種の造礁サンゴが確認された²⁹⁾。まず、海岸から35m地点までは礫～砂泥底が広がっており、ここでは沖側の基盤から剥がれて流されてきたと考えられる*Favia speciosa*の小群体や転石上に固着した塊状～被覆状の*Oulastrea crispata*がわずかにみられるのみであった。海岸から30-40m地点の礁原上(水深1.5-2m)では*F. speciosa*が優占しており、海岸から40m地点より先の水深10m付近まで広がる礁斜面では、葉状～被覆状の*Lithophyllum undulatum*や*Echinophyllia echinata*が多くみられた(図2d)。また、*Leptastrea pruinosa*や*Cyphastrea japonica*などの被覆状～塊状のFaviidsや、束状の*Caulastrea tumida*が局所的に多くみられる範囲もあった。これらの造礁サンゴ群集の全被覆率は、平均27.6%(最大89.1%)で、海岸から35-50m付近の礁原・礁斜面での被覆率が非常に高かった。全種数は平均2.4種で、礁原内縁部で最大9種となり、それから礁斜面深部に向かって減少した。

長崎県対馬瀬ノ浦は、北北東に湾口をもつ水深10m程度の非常に小さな入り江で(図1e)、周囲には新第三系対州層群の泥岩と砂岩の互層が露出する⁴²⁾。造礁サンゴは、瀬ノ浦を含む網浦の南岸に多くみられる。瀬ノ浦では、規模は小さいものの壱岐黒崎のサンゴ礁に類似する造礁サンゴで形成された地形的高まりが存在する(図2e)。湾口近くに設置された長さ40mの基線と計11本の測線の調査により、ここでは3科5属7種の造礁サンゴが確認された(表1)。まず、海岸から24m地点までの岩盤上や砂泥底に転がる礫上では*Oulastrea crispata*の小群体が多くみられた(図2e)。また、沖側の基盤から剥がれて流されてきたと思われる束状の*Caulastrea tumida*や塊状の*Favia speciosa*の小群体も砂泥底上でわずかにみられた。海岸から24-30m地点(水深1.5-2m)に相当する地形的な高まりの上では*C. tumida*や*F. speciosa*が優占していた。海岸から30m地点から入り江の中央部にかけて広がる水深2-8mの斜面上では、葉状～被覆状の*Lithophyllum undulatum*や*Echinophyllia echinata*が卓越していた。これらの造礁サンゴ群集の全被覆率は平均37.0%(最大94.3%)で、海岸から24-40m付近で高かった。全出現種数は平均2.4種で、海岸から24m地点(地

形的高まりの内縁部)で最大5種となり、その後斜面下部に向かって減少する傾向がみられた。調査地点よりも内湾に位置する水深1-2mの浅瀬では、被覆状の*Cyphastrea japonica*が広く分布しており、さらに湾奥の水深1-2mの濁った環境下では、塊状の*Alveopora japonica*と塊状～被覆状の*Oulastrea crispata*の小群体が密集してみられた。

島根県島前松島周辺と島後南西岸には(図1f)、新第三系～第四系の隠岐アルカリ火山岩類が広く分布している^{43, 44)}。*Oulastrea crispata*、*Alveopora japonica*と*Psammocora profundacella*の3科3属3種が、この一帯の水深1-20m付近で確認された(表1)。みられた*O. crispata*は、どれも直径5cm程度と小型の塊状～被覆状群体で、水深1-2mの岩盤上もしくはそれらの礫上で密集してみられた。一方*Alveopora japonica*と*P. profundacella*は、水深15-20mの岩盤上あるいは巨礫上で稀にみられる程度で、前者は最大で直径10cm程度の塊状群体、後者は直径30cm程度の塊状～被覆状群体を形成していた。

図3は、鹿児島県甬島列島から島根県隠岐諸島にかけての各調査地点から得られた造礁サンゴの相対被覆率(表2)をもとに作成した、九州西岸から隠岐諸島にかけての緯度の増加に伴う造礁サンゴ群集の優占種の変化概念図である。ただし、天草諸島海域については、過去の同様の研究結果^{7, 16, 27)}をもとに見積もられている。まず、鹿児島県上甬島市ノ浦では、卓状の*Acropora hyacinthus*、板状の*Pavona decussata*、枝状の*Acropora muricata*が優占しており、これらに伴って塊状～被覆状のFaviids、卓状の*Acropora glauca*や*Acropora japonica*がみられた。この結果は、この海域では*A. hyacinthus*や*A. muricata*といった琉球列島のサンゴ礁域でみられる亜熱帯性の*Acropora*種が、*A. glauca*や*A. japonica*といった温帯性の*Acropora*種や塊状～被覆状のFaviidsよりも優占していることを示唆する。同様の構造を持つ造礁サンゴ群集は、太平洋側の高知県大月町や和歌山県串本町などでみられる^{21, 22, 23)}。

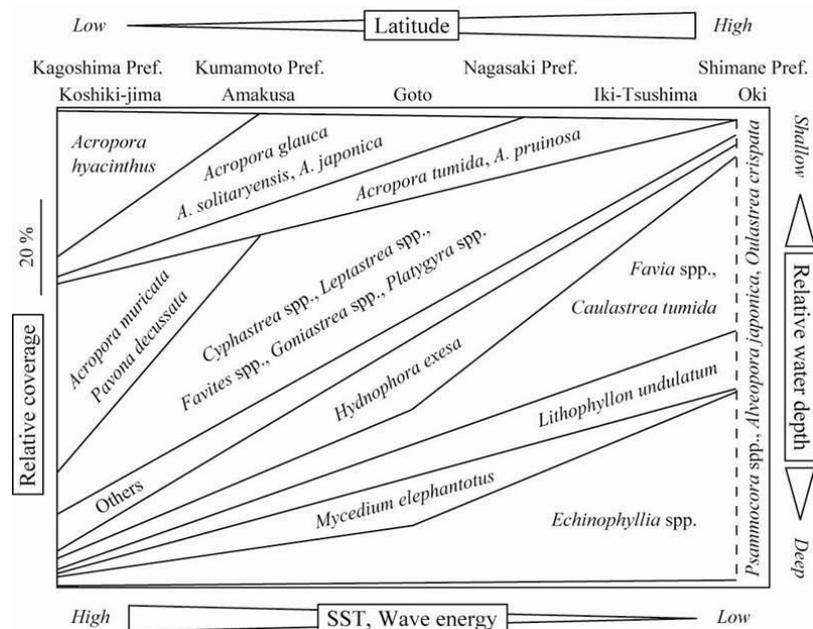


図3 甬島列島から隠岐諸島にかけての主な造礁サンゴの相対被覆率変化の概念図

長崎県福江島布浦でみられた造礁サンゴ群集は、塊状～被覆状の*Leptastrea pruinosa*を含む

Faviidsや*Hydnophora exesa*が優占し、それらに枝状の*Acropora tumida*、卓状の*Acropora solitaryensis*や被覆状～葉状の*Echinophyllia aspera*などが随伴する。このことは、この地点では被覆状～塊状サンゴが卓状や枝状の*Acropora*種よりも卓越する傾向が高いことを示唆する。ただし、調査地点から東側のより内湾部に位置する水深2-3mの入り江では*Acropora tumida*を、福江島南方の津多羅島(図1c)北岸の水深10m以浅では卓状*Acropora*(*A. solitaryensis*、*A. glauca*や*A. japonica*)をそれぞれ優占種とする造礁サンゴ群集が密生している¹⁵⁾。また、同県若松島滝ヶ原では、被覆状～葉状の*Mycedium elephantotus*、被覆状～塊状の*Hydnophora exesa*や*Cyphastrea serailia*、そして卓状の*Acropora glauca*が、枝状の*Acropora. pruinosa*、塊状～被覆状のFaviids、葉状～被覆状の*Echinophyllia* spp. や塊状の*Alveopora japonica*とともにみられる。福江島布浦と若松島滝ヶ原の造礁サンゴ群集を比較すると、優占種は異なるものの属または科レベルでみるとほぼ同じ群集構造を持っており、それらの成長形もよく類似する。同様に、若松島の東側に位置する中通島南端の三ツ瀬では(図1c)、卓状*Acropora*(*A. solitaryensis*、*A. glauca*や*A. japonica*)を優占種とする造礁サンゴ群集がみられることを考慮すると、福江島から若松島や中通島を含む五島列島海域では、より外洋に近いところで温帯性の卓状*Acropora*種が、より内湾の遮蔽的な環境で温帯性の枝状*Acropora*種がそれぞれ卓越すると考えられる。また、これらの中間的な環境であると考えられる今回の調査地点では、被覆状～塊状サンゴが卓状および枝状*Acropora*種を伴って群集を構成するため、結果的にそれらの群集の被覆率と出現種数が最も高くなると考えられる。さらに、鹿児島県上甕島で特徴的にみられた枝状の*Acropora muricata*や板状の*Pavona decussata*は、五島列島のどの調査地点でも生息を確認することができなかった。また、卓状の*Acropora hyacinthus*については、津多羅島と若松島で直径30cm程度の群体をそれぞれ1群体ずつ確認したのみであった。このことは、五島列島海域では亜熱帯性の*Acropora*種がほとんどみられないことを示唆している。なお、今回の調査で生息が確認された*A. hyacinthus*は、長崎県によって五島列島～平戸周辺海域で行われた海中公園予定地選定のための学術調査結果^{32, 33)}に掲載されている出現種リストには含まれていない。よって、この種は最近この海域まで生息域を北上させた可能性が高い。

鹿児島県上甕島と長崎県福江島の間位置する熊本県天草諸島海域では、生息する造礁サンゴの垂直分布、群集構造や繁殖様式が詳細に調査されている^{7, 16, 27, 28)}。これらの調査結果、特に被覆率のデータを参照すると、天草下島南東部に位置する牛深の沖合に浮かぶ小島(桑島、大島、片島)の島陰(東～北東側)になる水深10m以浅では、卓状の*Acropora*種が優占しており、ここでは*A. solitaryensis*をはじめとする温帯性の*Acropora*種と亜熱帯性の*A. hyacinthus*が混在して分布している。しかし、これらの種の相対被覆率は上甕島で得られた本研究結果と異なり、温帯性の*Acropora*種のほうが亜熱帯性の*A. hyacinthus*よりも高い。次に、牛深に近い春這や砂月浦といった湾内の水深10m以浅では、卓状の*Acropora*種は分布するものの、*Cyphastrea serailia*や*Favia speciosa*といった塊状～被覆状のFaviids、*Echinophyllia aspera*や*Mycedium elephantotus*といった葉状～被覆状のPectiniids、そして枝状の*Acropora*種がより卓越している。このことから、天草諸島海域でみられる造礁サンゴの生息環境と群集構造は、上甕島よりもむしろ福江島や若松島を含む五島列島海域のそれらに類似していると言えよう。ただし、五島列島海域での生息が確認されなかった*Acropora muricata*(過去の文献^{16, 27)}では*A. aff. striata*と記述)や*Pavona decussata*は、この海域での生息が確認されていることから、現在これらの種の九州西岸での生息

北限は熊本県天草諸島海域であると考えられる。

長崎県壱岐黒崎と同県対馬瀬ノ浦でみられる造礁サンゴ群集は、ほぼ同じ種構成で、どちらも塊状の*Favia speciosa*や葉状～被覆状の*Lithophyllon undulatum*や*Echinophyllia* spp. が卓越し、束状の*Caulastrea tumida*、塊状～被覆状の*Hydnophora exesa*やFaviids (*Leptastrea pruinosa*や*Cyphastrea japonica*など) を伴う^{29, 30)}。また、壱岐神瀬 (図1d) や対馬太田浦 (図1e) では、ほぼ枝状の*Acropora tumida*のみで構成された造礁サンゴ群集がみられる^{29, 30)}。これらの結果からもわかるように、壱岐や対馬でみられる造礁サンゴ群集の特徴として挙げられるのは、卓状の*Acropora*種が全くみられないことである³⁰⁾。過去の文献^{32, 33)}によると、卓状の*Acropora leptocyathus* (その後の研究^{1, 30)}では*Acropora japonica*と考えられている) の分布が長崎県五島列島の中通島とほぼ同じ緯度に位置する同県西彼杵半島の西岸で確認されているが、それより北に位置する同県平戸付近では確認されていない。このことから、九州西岸における温帯性の卓状*Acropora*種の生息北限は北緯33°付近と考えられる。

島根県隠岐諸島で分布が確認された造礁サンゴは*Oulastrea crispata*、*Alveopora japonica*と*Psammocora profundacella*の3種のみで、*O. crispata*は湾奥の海岸近くの水深1-2m、*Alveopora japonica*と*P. profundacella*は外洋島陰の水深15-20mの範囲でのみみられた。この結果は、過去に同地域での行われた調査結果³¹⁾と変わらない。したがって、より南方でみられる種が、過去15年間でこの海域に新たに加入し、その生息範囲を北上させた可能性は低いと考えられる。*Oulastrea crispata* は、日本および北西太平洋で最も北に生息する造礁サンゴで、日本海側では石川県の能登半島や新潟県の佐渡や柏崎まで分布することが知られている^{45, 46, 47)}。一方、*Alveopora japonica*と*P. profundacella*は、韓国の済州島南岸でも同様の水深範囲での生息が確認されている⁴⁸⁾。また、本研究によって*Alveopora japonica*と*O. crispata*は、長崎県五島列島以北でその生息が目立ちはじめ (表1)、若松島や対馬では他のサンゴが生息していないような湾奥の浅瀬で顕著にみられることが明らかになった。さらに、島根県南西部の大田では、*Psammocora profundacella* に類似する*P. superficialis*の分布が確認されている⁴⁹⁾。以上の結果から、*O. crispata*、*Alveopora japonica*と*Psammocora* spp. は、波浪の影響の少ない遮蔽的な環境を好み、他の造礁サンゴ種よりも低水温や濁りといった厳しい環境条件下で生息できる耐性を持っていると推定される。太平洋側での造礁サンゴの生息北限となっている千葉県の館山では、上記の3種を含む11種で構成される造礁サンゴ群集が水深3-8mの範囲でみられる²⁶⁾。また、この群集ではこれら3種が優占種になっていることや、出現頻度は低いものの*Favia speciosa*や*F. fava*を含むことから、今後の調査によっては、同様の構造を持つ群集が長崎県壱岐・対馬から島根県隠岐諸島の間の海域で確認される可能性が高いと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義 ～造礁サンゴ群集の緯度変化～

本研究によって明らかにされた、九州西岸 (鹿児島県、熊本県と長崎県を含む) から島根県隠岐諸島にかけての造礁サンゴの生息環境と群集構造の緯度変化を表2にまとめる。

表2 九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴの生息環境と群集構造

Study site	Habitat	Depth (m)	Substrate	Mean (maximum) number of species	Mean (maximum) coverage (%)	Dominant species	
Kamikoshiki-jima (Kagoshima Pref.)	Ichinoura (N31°50')	Leeward of isles	< 10	Sedimentary rocks	4.5 (11)	34.3 (74.6)	<i>Acropora hyacinthus</i> , <i>Pavona decussata</i> <i>Acropora muricata</i> , <i>Acropora japonica</i>
	Nunoura (N32°40')	Sheltered bay mouth	< 10	Sedimentary rocks	3.7 (8)	25.7 (70.8)	<i>Leptastrea pruinosa</i> , <i>Favites russelli</i> <i>Hydnophora exesa</i> , <i>Acropora tumida</i>
Fukue-jima (Nagasaki Pref.)	Tsutara	Leeward of isles		No quantitative data	No quantitative data	<i>Acropora solitaryensis</i> , <i>Acropora glauca</i> <i>Acropora japonica</i>	
Wakamatsu-jima (Nagasaki Pref.)	Takigahara (N32°50')	Sheltered bay mouth	< 10	Sedimentary rocks	5.4 (13)	19.5 (93.9)	<i>Mycedium elephantotus</i> , <i>Acropora glauca</i> <i>Hydnophora exesa</i> , <i>Cyphastrea serailia</i>
Nakadouri-jima (Nagasaki Pref.)	Mitsuse	Leeward of isles		No quantitative data	No quantitative data	<i>Acropora solitaryensis</i> , <i>Acropora glauca</i> <i>Acropora japonica</i>	
Iki (Nagasaki Pref.)	Kurosaki (N33°50')	Sheltered bay mouth	< 10	Reef rock, Volcanic rocks, Sedimentary rocks	2.4 (9)	27.6 (89.1)	<i>Favia</i> spp., <i>Lithophyllon undulatum</i> <i>Echinophyllia</i> spp., <i>Cyphastrea japonica</i>
	Kouze	Inside of small bay	2-3	Sedimentary rocks	No quantitative data	No quantitative data	<i>Acropora tumida</i>
Tsushima (Nagasaki Pref.)	Ohtaura			No quantitative data	No quantitative data	<i>Acropora tumida</i>	
	Senoura (N34°30')	Sheltered bay mouth	< 10	Reef rock, Sedimentary rocks	2.4 (5)	37.0 (94.3)	<i>Favia</i> spp., <i>Lithophyllon undulatum</i> <i>Echinophyllia</i> spp., <i>Caulastrea tumida</i>
		Inside of small bay	1-2		No quantitative data	No quantitative data	<i>Oulastrea crispata</i> , <i>Alveopora japonica</i>
Okii (Shimane Pref.)	Douzen, Dougo (N36°10')	Inside of small bay	1-2	Volcanic rocks	No quantitative data	No quantitative data	<i>Oulastrea crispata</i>
		Leeward of isles	15-20		No quantitative data	No quantitative data	<i>Psammocora profundacella</i>

まず、どの調査地域においても、造礁サンゴは砂岩などの堆積岩、玄武岩などの火山岩あるいは死亡したサンゴ骨格のような固結した底質上で多くみられ、未固結の砂泥底上ではほとんどみられなかった。このことから、高緯度域での造礁サンゴ群集の繁茂には、堅固で細粒そして緻密な底質もしくは石灰質の底質が必要であると考えられる。次に、生息種数と被覆率がともに高い造礁サンゴ群集がみられたのは、波浪エネルギーが中程度で濁度が小さいと推定される地点（外洋に近い島陰あるいはやや遮蔽的な湾口）の水深10m以浅であった。また、鹿児島県上甕島から長崎県対馬にかけての九州西岸における造礁サンゴの生息環境は、緯度の増加とともにより遮蔽的な内湾の浅海域へ局所化していく傾向がみられた。この原因としては、高緯度域の造礁サンゴほど骨格の伸長速度が遅く、温帯の浅海域で卓越する大型藻類との競争に勝てない^{6, 50)}ために、大型藻類があまり繁茂しない遮蔽的で濁った環境へそれらの生息範囲が制限されている可能性が考えられる。あるいは、サンゴ礁域の造礁サンゴは凹凸や空隙が多く存在する石灰岩上に固着している。しかし、本研究結果からもわかるように非サンゴ礁域の造礁サンゴは、細粒で緻密な堆積岩もしくは火山岩からなる非石灰質の岩盤上に直接固着して成長していることが多い。よって、非サンゴ礁域の波浪の強い浅海域では、群体が大きくなればなるほどこれらの基盤から取り除かれる可能性が高く、造礁サンゴがあまり生存できないのかもしれない^{7, 51, 52)}。隠岐諸島では、内湾の海岸近くの水深1-0m付近と外洋に近い島陰の水深15-20mのみで造礁サンゴの生息が確認されたことは、これらの要因を反映しているのかもしれない。ただし本研究では、隠岐諸島を除くと水深10m以深での調査が行われていないため、これらの考察を裏付けるためには今後少なくとも水深10m以深での詳細な調査が必要となるであろう。なお、島根県隠岐諸島での造礁サンゴの生息水深が15-20mへ制限されていた理由としては、高緯度域の浅海域における冬季の海水温（SST）が、相対的に深いところよりも低下することも考えられる⁵³⁾。その他にも、長崎県福江島から同県対馬

にかけては、主な造礁サンゴ群集が島の西岸に集中して生息する傾向があることが確認された（図1c-1e）。この原因としては、対馬海流が各島の西側に沿って北上することにより、南方のより種多様性の高い造礁サンゴ群集からの幼生の分散と加入頻度が高いこと^{11, 13)}、西側の表層海水温の方が高いため（気象庁 2009b）⁵⁴⁾に造礁サンゴが比較的生存・生育しやすいこと⁶⁾などが考えられる。

各調査地点でみられた造礁サンゴ群集の構成種数、長さ10mの測線1本あたりの平均出現種数は、それぞれ緯度の増加とともに減少し、特に長崎県五島列島と同県壱岐・対馬の間および壱岐・対馬と島根県隠岐諸島の間で急激に減少した（表1；表2）。これらの生息種数の減少は、各海域で卓越する分類群の種多様性に関与していると考えられる（図3）。まず、鹿児島県上甕島での優占種は、亜熱帯性の卓状・枝状*Acropora* (*A. hyacinthus*や*A. muricata*)であった。次に、熊本県天草諸島から長崎県五島列島にかけては、温帯性の卓状・枝状*Acropora* (*A. glauca*や*A. tumida*など)や被覆状～塊状のサンゴ (*Leptastrea pruinosa*, *Mycedium elephantotus*や*Hydnophora exesa*など)であった。さらに、長崎県の壱岐と対馬では、温帯性の卓状*Acropora*種はみられず、塊状の*Favia* spp.と葉状～被覆状のサンゴ (*Echinophyllia* spp.や*Lithophyllon undulatum*など)が大部分を占めていた。そして島根県隠岐諸島では、わずか3種の塊状～被覆状サンゴの生息が非常に狭い範囲でわずかに確認されたのみであった。したがって、五島列島と壱岐・対馬間での造礁サンゴ群集の生息種数の減少には卓状*Acropora*種の、壱岐・対馬と隠岐諸島間では塊状*Favia*種や葉状～被覆状種の消滅が大きく関与していると思われる。一方、平均被覆率については、五島列島までは次第に減少するが、そこから壱岐・対馬にかけて再び増加する傾向がみられた。これは、上甕島から五島列島にかけて優占する卓状*Acropora*種の被覆率が次第に減少することや、五島列島から壱岐・対馬にかけて塊状*Favia*種や葉状～被覆状サンゴ種の被覆率が次第に増加することが影響していると思われる。また、最大被覆率についても、五島列島の若松島を除くと同様の傾向がみられた。このように若松島で例外的に高くなっている原因としては、五島列島海域では局地的に被覆状～塊状種が優占する範囲があることと関連していると思われる。以上のことから、九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴの群集構造や種多様性の緯度変化には、緯度の北上に伴う表層海水温の低下で低水温への耐性を持たない優占種や随伴種が消滅すること、各海域の優占種の成長形が異なっていることと関係していると考えられる。

（2）地球環境政策への貢献 ～高緯度域の造礁サンゴの保全・モニタリングに向けて～

本研究によって得られた九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴの生息環境と群集構造の緯度変化に関する結果と考察は、高緯度域の造礁サンゴを学術的価値に基づいてどのように保全していくのかを検討するうえで重要である。例えば、本海域における造礁サンゴ群集の生息環境は、ほとんどの地域が水深10m以浅の湾口もしくは湾奥というごく限られた範囲で、これらの群集の中には*Acropora pruinosa*や*Alveopora japonica*といった日本本土近海の固有種も含まれていた。しかし、これらの地点の多くは農地や住宅地あるいは漁港に近接しており、中には日常的に赤土、生活排水や廃油などの流入や廃品投棄が起きている地点もあった^{29, 30)}。また、そこで暮らす人々が、それらの造礁サンゴの存在すら知らないことが多かった。よって、こうした地域の造礁サンゴやそれを取り巻く沿岸生態系を保全していくためには、まず地域住民や自治体が北限域の造礁サンゴの重要性を理解し、造礁サンゴへの日常的なストレスを軽減させるような沿岸域の利用を

心がけることが必要であろう。そのためには、彼らに向けた学識経験者による講演、パネル展示や資料配布などを通じて、これらの造礁サンゴの学術的価値だけでなく漁業資源としての間接的価値、すなわち沿岸生態系での造礁サンゴの役割を啓蒙することが有効であると考えられる。

日本の高緯度域での造礁サンゴ群集の緯度変化は、黒潮や対馬海流といった暖流の北上に伴う表層海水温の低下に関連していると考えられる。よって、今後これらの群集のモニタリングを行うことが、地球温暖化に伴う表層海水温の上昇などの地球規模での攪乱による沿岸生態系の変化を知る上でも非常に重要である。例えば、鹿児島県の上甕島で顕著にみられた卓状 *Acropora hyacinthus*、枝状 *Acropora muricata* や板状 *Pavona decussata* は、高知県から和歌山県の南岸でも卓越している種である^{21, 22, 23)}。これらの種は、熊本県の天草諸島海域（北緯32°付近）では稀な種であったが、近年その被覆率と生息範囲が温帯性の卓状 *Acropora* 種とともに増加している。また、*A. hyacinthus* については、30年前には確認されていなかった長崎県の五島列島海域（北緯33°付近）まで生息域を拡大させていることが、本研究結果から明らかになった。このように、現在生息域の拡大・北上が確認されている種、あるいは今後それらが予想される種の生息域と表層海水温の関係を明らかにすることが、造礁サンゴをはじめとする生物群集が近年の表層海水温の上昇にどのような応答をしているかを解明する手がかりになると思われる。特に、本研究の対象海域においては、造礁サンゴの種多様性が激減する長崎県の五島列島～壱岐・対馬（北緯34°付近）間や壱岐・対馬～島根県隠岐諸島（北緯36°付近）間の海域でこれらの詳細なモニタリングを行うことによって、同様の成果が期待できるものと考えられる。さらに今後は、これらの種の被覆率と生息範囲だけでなく新規加入や死亡などの情報を含む群体数の変化についても重点的にモニタリングすることが有効であろう^{7, 28)}。その他に、高緯度域でみられる造礁サンゴ各種の耐性や、それらと共生関係にある褐虫藻のクレードが、SSTや日射量などの環境要因の緯度勾配とともにどのように変化するかを調べることもまた、高緯度域における沿岸生態系変化の良い指標になるものと思われる⁵⁵⁾。また本研究では、調査範囲、調査測線の長さやそれらの設置間隔などの妥当性については検証されていない。これらが増加することにより得られたデータの精度が上下する可能性は十分に考えられるため、モニタリングを進める上ではこのような空間スケールについての十分な配慮が望まれる。

6. 引用文献

- 1) J. E. N. Veron: Coral Reefs, 11, 13-21 (1992) "Conservation of biodiversity: a critical time for the hermatypic corals of Japan"
- 2) 福田照雄・野村恵一：海中公園情報, 93, 3-14 (1991) 「黒潮流域のイシサンゴ類と魚類の分布に関する知見」
- 3) J. E. N. Veron: Pac Sci, 46, 405-425 (1992) "Environmental control of Holocene changes to the world's most northern hermatypic coral outcrop"
- 4) J. E. N. Veron: Australian Institute of Marine Science Monograph Series 9 (1992) "Hermatypic corals of Japan"
- 5) 西平守孝・J. E. N. Veron: 海游舎, 東京 (1995) 「日本の造礁サンゴ類」
- 6) V. J. Harriott: Coral Reefs, 18, 281-291 (1999) "Coral growth in subtropical eastern"

Australia”

- 7) Y. Nozawa, M. Tokeshi, and S. Nojima: *Mar Ecol Prog Ser* 358, 151-160 (2008) “Structure and dynamics of a high-latitude scleractinian coral community in Amakusa, southwestern Japan”
- 8) H. Fukami: *Galaxea*, 10, 47-55 (2008) “Short review: molecular phylogenetic analyses of reef corals”
- 9) H. Yamano, K. Hori, M. Yamauchi, O. Yamagawa, and A. Ohmura: *Coral Reefs*, 20, 9-12 (2001) “Highest latitude coral reef at Iki Island, Japan”
- 10) 山野博哉: *沿岸海洋研究*, 46, 3-9 (2008) 「日本におけるサンゴ礁の分布」
- 11) J. E. N. Veron and P. R. Minchin: *Cont Shelf Res*, 12, 835-857 (1992) “Correlations between sea surface temperature, circulation patterns and the distribution of hermatypic corals of Japan”
- 12) J. E. N. Veron: UNSW Press, Sydney (1995) “Corals in space and time: The biogeography and evolution of the scleractinia”
- 13) V. J. Harriott and S. A. Banks: *Coral Reefs*, 21, 83-94 (2002) “Latitudinal variation in coral communities in eastern Australia: a quantitative biophysical model of factors regulating coral reefs”
- 14) 気象庁:
http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html (2009)
- 15) 環境省自然環境局生物多様性センター: モニタリングサイト1000, 平成15~17年度サンゴ礁モニタリング調査取りまとめ報告書 (2006)
- 16) 野島 哲: *みどりいし*, 15, 5-11 (2004) 「天草の造礁サンゴ群集について」
- 17) 野村恵一・内田紘臣・福田照雄: *南紀生物*, 50, 191-200 (2008) 「串本産造礁サンゴ類の変遷」
- 18) T. Nakamori: *Sci Rep Tohoku Univ (2nd Ser Geol)*, 56, 71-133 (1986) “Community structures of recent and Pleistocene hermatypic corals in the Ryukyu Islands, Japan”
- 19) T. Nakamura and T. Nakamori: *Coral Reefs*, 28, 229-250 (2009) “Estimation of photosynthesis and calcification rates at a fringing reef by accounting for diurnal variations and the zonation of coral communities on reef flat and slope: a case study for the Shiraho reef, Ishigaki Island, southwest Japan”
- 20) E. Ikeda, Y. Iryu, K. Sugihara, H. Ohba, and T. Yamada: *Island Arc*, 15, 407-419 (2006) “Bathymetry, biota and sediments on the Hirota Reef, Tane-ga-shima – the northernmost coral reef in the Ryukyu Islands”
- 21) 野村恵一・目崎拓真: *Kuroshio Biosphere*, 2, 29-41 (2005) 「高知県大月町海域から記録された造礁性サンゴ類」
- 22) 野村恵一: *マリンパビリオン*, 35, 10-11 (2006) 「串本のサンゴ群集〈14〉, 総括1: 種数と代表種」
- 23) 野村恵一: *マリンパビリオン*, 35, 26-27 (2006) 「串本のサンゴ群集〈15〉, 総括2: サンゴ相、被度、重要群落」

- 24) G. W. Tribble and R. H. Randoll: Coral Reefs, 4, 151-159 (1986) "A description of the high-latitude shallow water coral communities of Miyake-jima, Japan"
- 25) 稲葉 慎: みどりいし, 14, 20-23 (2003) 「小笠原諸島の造礁サンゴの生態的特徴と現況」
- 26) 萩原良太: みどりいし, 14, 24-30 (2003) 「千葉県館山湾坂田地先に生息する造礁サンゴ類の分布, 生息環境および有性生殖」
- 27) 野島 哲・Y. Yeemin: 奥谷喬司・太田 秀・上島 励 (編) 水棲無脊椎動物の最新学, 東海大学出版会, 東京, pp41-58 (1999) 「非サンゴ礁の造礁サンゴの群集構造と垂直分布」
- 28) Y. Nozawa, M. Tokeshi, and S. Nojima: Mar Biol, 149, 1047-1058 (2006) "Reproduction and recruitment of scleractinian corals a high-latitude coral community, Amakusa, southwestern Japan"
- 29) 山野博哉・杉原 薫・中井達郎・山川 修: 環境省・日本サンゴ礁学会 (編) 日本のサンゴ礁, 環境省, 東京, pp250-252 (2004) 「壱岐」
- 30) 杉原 薫・山野博哉: 環境省・日本サンゴ礁学会 (編) 日本のサンゴ礁, 環境省, 東京, pp252-256 (2004) 「対馬」
- 31) 野村恵一・梶村光男・内田紘臣: 海中公園情報, 106, 7-11 (1994) 「隠岐諸島における造礁性イシサンゴ類について」
- 32) 江口元起: 長崎県海中公園学術調査報告書1, 長崎県, pp19-31 (1971) 「長崎県海中公園候補地の石サンゴ類」
- 33) 江口元起: 長崎県海中公園学術調査報告書 [上五島・平戸・九十九島地区], 長崎県, pp39-46 (1975) 「長崎県海中公園候補地の石珊瑚類 (上五島・平戸・九十九島地区)」
- 34) J. E. N. Veron: Australian Institute of Marine Science, Townsville (2000) "Corals of the world"
- 35) J. E. N. Veron: Australian Institute of Marine Science, Townsville 11 (2002) "New species described in coral of the world"
- 36) C. C. Wallace: CSIRO Publishing, Collingwood (1999) "Staghorn corals of the world"
- 37) 藤内智士・大岩根 尚・清川昌一: 地質学雑誌, 114, 547-559 (2008) 「鹿児島県甬島列島北部の地質構造と古応力解析」
- 38) 河田清雄・鎌田泰彦・松井和典: 地質ニュース, 498, 28-29 (1996) 「5万分の1地質図幅 [福江]」
- 39) 安永 雅・清川昌一・植村和彦: 堆積学研究, 64, 155-161 (2007) 「長崎県五島列島中部 (若松島及び中通島西部) の新第三系五島層群の岩相層序と植物化石の産出について」
- 40) 鬼頭 剛・坂井 卓・岡田博有: 堆積学研究会報, 38, 57-66 (1993) 「壱岐, 中新統勝本層に見られる背弧海盆堆積物の堆積相と堆積環境」
- 41) 山野博哉: 地理, 46, 55-62 (2001) 「壱岐のサンゴ礁ー世界最高緯度のサンゴ礁発見までの経緯ー」
- 42) 大竹左右一・伊藤 慎・中条武司: 堆積学研究, 64, 61-64 (2007) 「長崎県対馬に分布する新第三系対州層群中に見られるデルタシステムの時間変化にともなうプロセス変化」
- 43) 金子信行・千葉とき子: 地質学雑誌, 104, 419-422 (1998) 「島根県隠岐島前中ノ島のアルカリかんらん石玄武岩の産状とK-Ar年代」

- 44) 小林伸治・沢田順弘・吉田武義：岩石鉱物科学, 31, 137-161 (2002) 「隠岐島後における末期中新世, 隠岐アルカリ火山岩類の地質とマグマ供給系」
- 45) Y. Honma and T. Kitami: Ann Rep Sado Marine Biol Station, Niigata Univ, 8, 7-81 (1978) “Fauna and flora in the waters adjacent to the Sado Marine Biological Station, Niigata University”
- 46) 矢島孝昭・佐野 修・岡本 武・白井芳弘・新谷 力・又多政博：金沢大学日本海域研究所報告, 18, 21-36 (1986) 「能登九十九湾におけるキクメイシモドキ *Oulastrea crispata* (Lamarck) の生態分布」
- 47) 山本正之・箕輪一博・林原 毅：柏崎市立博物館館報, 10, 85-95 (1996) 「柏崎市地先におけるキクメイシ科サンゴ外骨格片の漂着記録とキクメイシモドキ *Oulastrea crispata* (Lamarck) の生息」
- 48) J. -I. Song: Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea, vol.39, Anthozoa. Daehan Textbook Corporation, Seoul (in Korean) (2004)
- 49) 内田紘臣：環境庁自然保護局（編）第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告書（日本の干潟、藻場、サンゴ礁調査）第3巻 サンゴ礁, 環境庁自然保護局, 東京, pp13-29 (1994) 「II. サンゴ礁調査結果の解析1. 非サンゴ礁海域調査結果の解析」
- 50) R. E. Johannes, W. J. Weibe, C. J. Crossland, D. W. Rimmer, and S. V. Smith: Mar Ecol Prog Ser, 11, 105-111 (1983) “Latitudinal limits of coral reef growth”
- 51) R. W. Grigg: Coral Reefs, 17, 263-272 (1998) “Holocene coral reef accretion in Hawaii: a function of wave exposure and sea level history”
- 52) V. J. Harriott, S. A. Banks, R. L. Mau, D. Richardson, and L. G. Robert: Mar Freshw Res, 50, 299-306 (1999) “Ecological and conservation significance of the subtidal rocky reef communities of northern New South Wales, Australia”
- 53) T. P. Burns: Coral Reefs, 4, 117-124 (1985) “Hard-coral distribution and cold-water disturbances in South Florida: variation with depth and location”
- 54) 気象庁：<http://www.data.kishou.go.jp/db/kaikyō/monthly/sst.html> (2009)
- 55) 諏訪僚太・井口 亮：日本サンゴ礁学会誌, 10, 13-23 (2008) 「造礁サンゴに共生する褐虫藻の分子系統学的研究に関するレビュー（北西太平洋を中心に）」
- 56) R. van Woessik: Coral Reefs, 14, 119-120 (1995) “Coral communities at high latitude are not pseudopopulations: evidence of spawning at 32°N, Japan”
- 57) A. Isobe: Cont Shelf Res, 19, 117-133 (1999) “On the origin of the Tsushima Warm Current and its seasonality”

7. 国際共同研究等の状況

日本学術振興会二国間交流事業

「日本及び韓国の温帯域に分布する造礁サンゴの群集構造・骨格年輪に基づく環境変動解析」

山野博哉・国立環境研究所（研究代表者）、杉原 薫・福岡大学、渡邊 剛・北海道大学
島村道代・北海道大学、Kiseong Hyeong・韓国海洋研究院

8. 研究成果の発表情報

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 杉原 薫・園田直樹・今福太郎・永田俊輔・指宿敏幸・山野博哉：日本サンゴ礁学会誌, 11, 51-67 (2009) 「九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴ群集の緯度変化」

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 永田俊輔・杉原 薫・深見裕伸：第12回日本サンゴ礁学会(2009) 「日本産Faviaの骨格形態と遺伝子の多様性」

(3) 出願特許

特に記述すべき事項なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催

- 1) 日本産造礁性イシサンゴ類の分類－現状と将来への展望－(平成21年11月27日、琉球大学熱帯生物圏研究センター、観客40名)
- 2) 日本の造礁サンゴの分布～現在・過去・未来～(平成22年 3月17日、スルガ銀行d-labo(東京ミッドタウン)、観客60名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記述すべき事項なし

(6) その他

特に記述すべき事項なし

RF-082 北限域に分布する造礁サンゴを用いた温暖化とその影響の実態解明に関する研究

(3) 造礁サンゴ分布の把握とデータベース化に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター 衛星観測研究室

山野博哉

平成20～21年度合計予算額	3,250千円
(うち、平成21年度予算額	1,300千円)

※予算額は、間接経費を含む

[要旨] 日本の九州・四国・本州沿岸は、造礁サンゴ分布の北限に位置し、地球温暖化に伴う水温上昇の影響を受けやすいと考えられる。しかしながら、九州・四国・本州沿岸においては、サンゴ分布の現状把握が遅れていた。聞き取り調査や現地調査を行った結果、サンゴは内湾や水深が大きく波当たりの弱い地点に分布しており、サンゴ分布は主に波あたりに規定されていると考えられた。また、過去と現在のサンゴ分布をデータベース化することにより、国内の数地点でサンゴ分布が北上あるいは拡大している可能性が示された。その数地点において、今後定点モニタリングできるよう、定点モニタリングサイトの提案を行った。

[キーワード] 造礁サンゴ、北限、分布、データベース、地球温暖化

1. はじめに

日本列島は造礁サンゴとサンゴ礁の分布の北限域に位置し、亜熱帯域に位置する沖縄から温帯域に位置する九州・四国・本州沿岸にかけて、緯度方向に造礁サンゴの群集構造とサンゴ礁地形が変化する。造礁サンゴの群集構造やサンゴ礁の形成と環境要因の関係を明らかにすることは、サンゴ礁の成立という基本的な問いに対する答えを与えてくれるだけでなく、地球温暖化の影響評価やサンゴ礁の保全といった今日的な課題に向けても応用できるものである。しかしながら、サンゴ分布の北限域にあたる九州・四国・本州沿岸においては、地球温暖化に伴う水温上昇の影響を受けやすいと考えられるにもかかわらず、サンゴ分布の現状把握が遅れていた。地球温暖化にともなうサンゴの群集構造の変化を解明するためには、サンゴの広域的な分布パターンを第一に明らかにし、代表的な地点を選定する必要がある。一方、九州・四国・本州沿岸においては、1970年代からいくつかの地点で環境庁（当時）の自然環境保全基礎調査等によってサンゴの広域分布調査が行われた。これらの結果をデータベース化し、本研究で行う調査結果と比較して、サンゴ分布の北上や拡大といった温暖化の影響の可能性が検討できると考えられる。さらに、本プロジェクト終了後において、今後の調査と比較できるよう、北上・拡大の可能性のある地点を含め、国内の数地点で位置データを取得し定点モニタリング体制を整えることが必要であると考えられる。

2. 研究目的

本研究においては、サンゴ分布北限域にあたる九州、四国、本州において、1) サンゴの大局的な分布パターンを把握すること、2) 過去の報告書や新たに得られたサンゴ分布情報のデータベース化を行い、過去からの変化を解析すること、3) 国内の数地点において、今後の調査と比較できるように、定点モニタリングサイトを提案することを目的とする。

3. 研究方法

(1) サンゴの分布パターン

分布北限域においては、サンゴは波当たりの弱い内湾に分布することが指摘されている¹⁾。本研究においては、波当たりに着目し、波当たりの弱い内湾でのサンゴ分布を踏査して確認するとともに、外洋に面した海域では、波当たりの弱くなる水深の大きい地点に着目してサンゴの探索を行った。地元への聞き取り調査とともに、国際サンゴ礁年活動「日本全国みんなで作るサンゴマップ」に寄せられた一般ダイバーやスノーケラーからの情報の整理を行った。現地調査の際には、水深の小さい地点に関してはスノーケルを、水深の大きい地点に関してはスキューバ潜水を用いた。

(2) サンゴ分布情報のデータベース化

1970年代には、海中公園制定のためのサンゴ分布と種に関する調査が行われているため、これら報告書や論文類²⁾⁻⁷⁾などの収集を行った。現地調査においては、サブテーマ2と共同でサンゴ分布調査を行って種同定を行うとともに、大規模なサンゴ群集が発見された対馬と壱岐においてサブテーマ1と共同で、ダイビングタンクを用いた掘削機で掘削を行い、得られた化石サンゴの年代測定を行った。これらとともに、(1)で得られた一般ダイバーやスノーケラーからのサンゴ分布情報に関してもデータベース化を行った。

(3) 定点モニタリングサイトの提案

本プロジェクト終了後も、今後の調査によって、温暖化に伴うサンゴ北上・拡大を明らかにするために、定点モニタリングサイトを設定する必要がある。(2)で明らかとなったサンゴ分布が北上・拡大している地点、サンゴ群集に基づく海域区分、環境省が行っている「モニタリングサイト1000事業」等との連携、を考慮して定点サイトの提案を行った。

4. 結果・考察

(1) サンゴの分布パターン

鹿児島県甬島、長崎県壱岐・対馬においては、大規模な群集が内湾に成立しているのが観察された。一方、外洋に面した海域においては、水深5mより深い地点にサンゴ群集が主に分布しているのが観察された(島根県隠岐、静岡県伊豆など)。サンゴ探索の際には波当たりを考慮することが重要である¹⁾と考えられ、今後のモニタリング地点の選定に関する指針を与えるものである。今後、波当たりや水深などの統一的な物理環境データベース⁸⁾を用いて各地域を特徴付け、サンゴの分布が可能な地域を抽出できる可能性がある⁹⁾。

(2) サンゴ分布情報のデータベース化

過去の報告書・論文に報告されているサンゴ種と現在のサンゴ種の比較を行った結果、長崎県五島列島でクシハダミドリイシとスギノキミドリイシ、千葉県館山でエンタクミドリイシの出現が示された。さらに、和歌山県串本では21種の新規サンゴ礁の参入が観察された¹⁰⁾。いずれも、既存の報告書・論文では当該海域より南方での分布が示されているため、最近の温暖化に伴って分布が拡大していることを示す可能性がある。北上に加え、熊本県天草においては、エンタクミドリイシの分布拡大が明らかとなっている¹¹⁾。

対馬・壱岐のコアから得られた化石サンゴは、約3500年前の年代を示した。これは、当該海域で今まで得られているサンゴ礁形成年代（約1400年前）¹²⁾より古く、サンゴ礁の形成がさらに長期にわたっていたことを示すものである。得られた化石サンゴは、塊状のキクメイシ科のサンゴを含んでおり、サブテーマ1と共同で年輪解析を行って水温を復元し、サブテーマ2と共同でコア中のサンゴの種を同定することにより、過去から現在にかけての水温変化と群集変化の関係を解析できる可能性がある。

(3) 定点モニタリングサイトの提案

サンゴ群集は、Veron and Minchin (1992)¹⁴⁾により、いくつかの群集構造に区分される。また、環境省「モニタリングサイト1000事業」においては、熊本県天草、長崎県五島・壱岐・対馬、高知県南岸、和歌山県串本、千葉県館山においてモニタリング（サンゴ種ではなく被度に基づく）がなされている。こうした点と、(2)の結果を考慮して、定点モニタリングサイトを提案する。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究により、九州・四国・本州沿岸におけるサンゴ分布域を物理環境により推定できる可能性があり、今後の重点モニタリング・保全区域の策定に応用できる可能性が明らかになった。また、サンゴ分布に関して統一的なデータベース化を行うことにより、最近の温暖化の影響によりサンゴ分布が北に拡大している可能性が示された。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究に基づく定点モニタリングサイトにおけるモニタリングと、環境省が行っている「モニタリングサイト1000事業」等との連携を行うことにより、温暖化影響の評価の広報・普及が可能となると考えられる。

6. 引用文献

- 1) 中井達郎：サンゴ礁地域研究グループ編「熱い自然」古今書院, 東京（1990）「北限のサンゴ礁」
- 2) 長崎県：海中公園センター調査報告（1971）「長崎県海中公園学術調査報告書（五島）」
- 3) 長崎県：海中公園センター調査報告（1972）「長崎県海中公園学術調査報告書（壱岐）」
- 4) 長崎県：海中公園センター調査報告（1973）「長崎県海中公園学術調査報告書（対馬）」
- 5) 長崎県：海中公園センター調査報告（1975）「長崎県海中公園学術調査報告書（上五島、

平戸、九十九島地区) 」

- 6) J.E.N. Veron: Pacific Science, 46, 405-425 (1992) “Environmental control of Holocene changes to the world’s most northern hermatypic coral outcrop”
- 7) 西平守孝・J.E.N. Veron: 海游舎, 東京 (1995) 「日本の造礁サンゴ類」
- 8) H. Shimazaki, H. Yamano, H. Yokoki, T. Yamaguchi, M. Chikamori, M. Tamura, and H. Kayanne: Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium, 1577-1584 (2006) “Global mapping of factors controlling reef-island formation and maintenance”
- 9) H. Yamano, T. Shibata, T. Nakai, and S. Yasumura: Abstract, 11th International Coral Reef Symposium (2008) “Large-scale characterization of coral habitats by physical environments”
- 10) H. Yamano, T. Shibata, T. Nakai, and S. Yasumura: Abstract, 11th International Coral Reef Symposium (2008) “Large-scale characterization of coral habitats by physical environments”
- 11) 野村恵一: 日本サンゴ礁学会誌, 11, 39-49 (2009) 「和歌山県串本海域における近年のサンゴ群集変化」
- 12) 野島 哲・岡本峰雄: 日本水産学会誌, 74, 884-888 (2008) 「造礁サンゴの北上と白化」
- 13) J.E.N. Veron and P.R. Minchin: Continental Shelf Research, 12, 835-857 (1992) “Correlations between sea surface temperature, circulation patterns and distribution of hermatypic corals of Japan”

7. 国際共同研究等の状況

日本学術振興会二国間交流事業（韓国との共同研究）及び日韓合同委員会の案件「日本及び韓国に分布する造礁サンゴによる環境変動解析」において、日本のサンゴ群集と韓国のサンゴ群集を比較し、共同で解析を行っている（カウンターパート：Kiseong Hyeong博士、韓国海洋研究院主任研究員）。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 山野博哉: 沿岸海洋研究, 46, 3-9 (2008) 「日本におけるサンゴ礁の分布」
- 2) K. Hyeong, M. Shimamura, T. Watanabe, H. Yamano, K. Sugihara, and J. Kim: Ocean and Polar Research, 30, 351-359 (2008) “Evaluation of Jeju/Tsushima hermatypic corals as sea surface temperature (SST) recorders”
- 3) 山野博哉・浪崎直子: 日本サンゴ礁学会誌, 11, 71-72 (2009) 「最前線のサンゴ：千葉県館山のエンタクミドリイシ群集の変化」
- 4) 杉原 薫・園田直樹・今福太郎・永田俊輔・指宿敏幸・山野博哉: 日本サンゴ礁学会誌, 11, 51-67 (2009) 「九州西岸から隠岐諸島にかけての造礁サンゴ群集の緯度変化」
- 5) 渡邊 剛・島村道代・山野博哉: 日本サンゴ礁学会誌, 11, 83-90 (2009) 「北限サンゴ礁から採取されたキクメイシ属サンゴ骨格中の酸素・炭素同位体比」

- 6) 山崎敦子・渡邊 剛・岨 康輝・中地シュウ・山野博哉・岩瀬文人：日本サンゴ礁学会誌, 11, 91-107 (2009) 「高知県竜串湾に生息する造礁性サンゴ骨格を用いた温帯域の古環境復元」

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 山野博哉：月刊みんぱく, 9月号, 3 (2008) 「サンゴ礁の今」
- 2) 山野博哉：Lagoon, 12, 6-8 (2009) 「空からサンゴ礁を調べる」
- 3) 山野博哉：国立環境研究所ニュース, 28, 10-12 (2009) 「陸・海・空・人～サンゴ礁研究の広がり」
- 4) 山野博哉：杉原 薫（監修）造礁サンゴフィールド図鑑（伊豆・三浦・房総編）(2009) 「造礁サンゴとは」

(2) 口頭発表（学会）

- 1) H. Yamano, K. Sugihara, T. Watanabe, M. Shimamura, and K. Hyeong: 11th International Coral Reef Symposium, Florida, USA (2008) “Reef building at high latitudes (34°N, Japan)”
- 2) 山野博哉・杉原 薫・渡邊 剛・島村道代・Kiseong Hyeong：日本サンゴ礁学会第11回大会(ワークショップ)・静岡 (2008) 「地球温暖化に対する北限域の造礁サンゴの応答」
- 3) 渡邊 剛・岨 康輝・永田俊輔・杉原 薫・山野博哉：日本サンゴ礁学会第11回大会・静岡 (2008) 「北限域に分布する造礁サンゴを用いた骨格密度の季節～経年変動の復元」
- 4) 杉原 薫・園田直樹・永田俊輔・山野博哉：日本サンゴ礁学会第11回大会・静岡 (2008) 「九州西部～隠岐にかけての造礁サンゴ群集の緯度変化」
- 5) H. Yamano: Int. Conf. Sustainability Sci. 2009 Tokyo (2009) “Coral reefs facing to global and regional environmental changes”
- 6) H. Yamano, K. Sugihara, N. Namizaki, and M. Kawachi: 5th ICRI East Asia Reg. Workshop. Hoi An (2009) “Global warming and high-latitude corals in Japan”
- 7) 山野博哉・河地正伸：JaLTER All Sci.Meet, 菅平 (2009) 「北限域に分布する海洋生物(サンゴ・附着性微細藻類)の温暖化影響モニタリング」
- 8) 杉原 薫・山野博哉：日本生態学会第57回全国大会・東京 (2010) 「九州から本州にかけてのサンゴ群集の緯度変異とサンゴ分布北上の可能性」

(3) 出願特許

特に記述すべき事項なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

日本サンゴ礁学会第11回大会ワークショップ「「やまと」のサンゴ、サンゴ礁を調べる～環境変化の指標としての高緯度サンゴ」2008年11月24日 静岡グランシップ

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 読売新聞（平成20年12月 6日、九州版）
- 2) 産経新聞（平成20年12月18日、全国版）
- 3) 読売新聞（平成22年 3月10日、全国版）

（6）その他

特に記述すべき事項なし