

学位論文題名

Control factors of coral skeletal stable isotopic compositions
and the application for monsoon proxies

（サンゴ骨格安定同位体組成の制御要因とモンスーン指標への応用）

学位論文内容の要旨

熱帯～亜熱帯浅海域に生育する造礁性サンゴは、生存期間が長く、年間の骨格成長量が大きいこと、過去の環境記録を連続的かつ高い時間解像度で有すると考えられている。特に骨格の炭酸カルシウムを構成する酸素同位体比（以下、 $\delta^{18}\text{O}_c$ ）は、形成時の水温および海水の酸素同位体比（塩分と正相関）によって決定されるため、サンゴの生育地域を問わず、観測記録のない過去の水温や塩分の復元が可能であると言える。しかしサンゴ骨格 $\delta^{18}\text{O}_c$ を用いた長期古環境復元の現状は、水温もしくは塩分どちらか一方の変動が卓越する熱帯域に研究が集中し、水温・塩分がともに変動する亜熱帯やモンスーン海域での復元例は極端に少ない。この原因を解く鍵として、これまでに報告されてきた、水温・塩分の環境記録がある現世サンゴ骨格 $\delta^{18}\text{O}_c$ 研究に共通する地域特性を整理してみる。すると、熱帯域では水温もしくは塩分の年間変動が亜熱帯に比べ小さいにも関わらず、骨格の $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動が明瞭に現れかつ年間変動量も比較的大きいものに対し、亜熱帯やモンスーン海域では水温・塩分の年間変動が大きいものにも関わらず、骨格の $\delta^{18}\text{O}_c$ 年間変動が比較的小さくなる傾向が認められる。つまり、熱帯域以外では何らかの原因で $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動シグナルが弱められるため、解釈が困難になると言える。一方 $\delta^{18}\text{O}_c$ と同時に分析される、骨格の炭酸カルシウムを構成する炭素の同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}_c$ ）には、複数の制御要因があるとされ、未だ制御要因と $\delta^{13}\text{C}_c$ との定量的関係が明らかになっていない。このため、一度の分析で $\delta^{18}\text{O}_c \cdot \delta^{13}\text{C}_c$ の2種類のデータが得られるにも関わらず、制御要因が未解明な $\delta^{13}\text{C}_c$ データは、環境復元に利用されずそのまま放置されるのが現状である。そこで本研究では、サンゴを用いた古環境復元の空白域である亜熱帯モンスーン地域の南シナ海から採取したサンゴ骨格を利用して、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動シグナルと環境との関係および $\delta^{13}\text{C}_c$ の主たる制御要因の解明と、そこから得られた知見を基に $\delta^{18}\text{O}_c \cdot \delta^{13}\text{C}_c$ からモンスーン指標を抽出することを目的とした。

$\delta^{18}\text{O}_c$ 変動シグナル制御要因の解明のため約1年にわたり、研究海域である南シナ海北部海南島東岸の Shalao 地区沖合で水温・塩分を約20分間隔で自動現場観測しこれを記録、海

水酸素同位体比用水試料を約月 1 回採取した。さらにこの期間に成長したサンゴ骨格の $\delta^{18}\text{O}_c$ を高時間分解能分析し、直接の制御要因である水温・塩分との詳細な対比を行った。その結果、 $\delta^{18}\text{O}_c$ は大局的には水温と塩分の変動に対応するため、この海域で見られる冬モンスーンによる水温低下パターン(12~2月)と、夏モンスーンによる降水の変動パターン(6月)を示していた。しかし大局的な変動パターンは示すものの、石灰化に適さない条件(水温 22°C 以下、塩分 27 以下)下では骨格の形成自体が物理的に停止するため、従来記録の欠損が無くほぼ完全に連続的であると考えられてきた $\delta^{18}\text{O}_c$ にも、記録が残らない条件があることが明らかとなった。さらに、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 実測値と水温・塩分の観測記録の詳細な対比は、月程度の間隔で骨格に時系列を入れることも可能にした。その結果、これまでほぼ一定と考えられてきたサンゴ骨格の成長速度は、水温や塩分の影響を受け、季節によりかなり大きく変わることが示された。

これら水温や塩分の大きな変動に由来する、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 記録の不連続や骨格成長量の季節変動は $\delta^{18}\text{O}_c$ の変動に直接影響を与えることから、熱帯以外の地域でシグナルを弱めている原因であると考えられる。またシグナルの歪みからも明らかのように、本研究海域で得られるサンゴ骨格の $\delta^{18}\text{O}_c$ をそのまま水温や塩分の復元に用いると、誤った環境条件を復元することにもなる。このように、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 記録は場合により不完全であるという全く新しい知見は、古環境復元が難しい海域での分析結果の解釈に新たな道筋をもたらしたと言える。

$\delta^{13}\text{C}_c$ の制御要因解明では、前述の $\delta^{18}\text{O}_c$ の検討で用いたサンゴ骨格について検討を行った。このサンゴでは既に詳細な時系列が確立されているため、主要な制御要因であるとされる海水中の全炭酸の炭素同位体比と光量が $\delta^{13}\text{C}_c$ に与える影響を評価した。海水中の全炭酸の炭素同位体比については、前述の海水の水酸素同位体比用水試料と同じく、約月 1 回の割合で採取し、光量に関しては Kubota *et al.* (2002)で報告された該当地域の月平均海面日射量データを用いた。海水中の全炭酸の炭素同位体比と $\delta^{13}\text{C}_c$ を対比した結果、両者の変動幅および変動パターンは大きく異なり、相関係数も非常に低かった($R=0.16$)。従って、海水中の全炭酸の炭素同位体比は $\delta^{13}\text{C}_c$ 主たる制御要因ではないと結論づけられる。一方、 $\delta^{13}\text{C}_c$ と海面日射量との間には非常に高い相関($R=0.75$)があり、変動パターンもほぼ一致することから $\delta^{13}\text{C}_c$ は主に光量により制御されていると考えるのが妥当である。

$\delta^{18}\text{O}_c$ および $\delta^{13}\text{C}_c$ の制御要因が明らかとなったため、環境記録の得られる 1990 年代に関して骨格同位体比の分析を行い、環境記録と対比を行った。前述の詳細分析の結果により、本研究海域から得られたサンゴ骨格 $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動から、直接水温や塩分を復元することはできないが、 $\delta^{18}\text{O}_c$ の変動パターンにはモンスーンによる季節変動パターンが保存されているため、これを時系列決定に利用した。一方、 $\delta^{13}\text{C}_c$ は主に光量によって制御されていることから、海面日射量との関係を検討した。その結果、6月の $\delta^{13}\text{C}_c$ は夏モンスーン中の降水休止期間の日射量を反映し、12~2月の $\delta^{13}\text{C}_c$ は冬モンスーンの北東風流入に伴う層雲形成で、

日射量が低下する様子を反映していた。特に冬モンスーン期間の北東風は、その風が強いほど明らかに層雲の形成を促し、日射量を低下させる傾向が見られた。また、この北東風強度は、東南アジアにおける冬モンスーン強度の指標としてそのまま用いられることも多いことから、サンゴ骨格に記録された 12~2 月の $\delta^{13}\text{C}_c$ は、直接冬モンスーン強度を表していると言える。以上をまとめると、本研究海域では 6 月の $\delta^{13}\text{C}_c$ は夏モンスーン期間の降水小休止期の海面日射量を復元可能であり、12~2 月の $\delta^{13}\text{C}_c$ は冬モンスーンの強度を表す指標として用いることが可能である。さらに、これらのモンスーン指標を利用して過去のモンスーンを復元することによって、この変動と他の気候変動現象との関係を解明することができると期待される。

学位論文審査の要旨

主査	教授	南川雅男
副査	名誉教授	大場忠道
副査	教授	杉本敦子
副査	教授	小野有五
副査	助教授	長尾誠也
副査	助教授	山本正伸
副査	助教授	豊田和弘

学位論文題名

Control factors of coral skeletal stable isotopic compositions and the application for monsoon proxies

(サンゴ骨格安定同位体組成の制御要因とモンスーン指標への応用)

造礁性サンゴは、生存期間が長く、年間の骨格成長量が大きいため、過去の環境記録を連続的かつ高い時間解像度で有すると考えられている。特に骨格の炭酸カルシウムを構成する酸素同位体比（以下、 $\delta^{18}\text{O}_c$ ）は、形成時の水温および海水の酸素同位体比（塩分と正相関）によって決定されるため、サンゴの生育地域を問わず、観測記録のない過去の水温や塩分の復元が可能である。しかしサンゴ骨格 $\delta^{18}\text{O}_c$ を用いた古環境復元は、水温もしくは塩分の変動が卓越する熱帯域で研究されることが多く、水温・塩分がともに変動する亜熱帯やモンスーン海域での復元例は少ない。そこで本研究では、水温・塩分の環境記録がある現世サンゴ骨格 $\delta^{18}\text{O}_c$ 研究に共通する熱帯域では、水温もしくは塩分の年間変動が亜熱帯に比べ小さいにも関わらず、骨格の $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動が明瞭であり、年間変動量も比較的大きいのに、亜熱帯やモンスーン海域では水温・塩分の年間変動が大きく、骨格の $\delta^{18}\text{O}_c$ 年間変動が比較的小さくなる傾向があるので、熱帯域以外では $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動シグナルが弱められる要因があると推定した。また $\delta^{18}\text{O}_c$ と同時に分析される、骨格の炭酸カルシウムを構成する炭素の同位体比（以下、 $\delta^{13}\text{C}_c$ ）は、複数の制御要因があつて未だ $\delta^{13}\text{C}_c$ と環境要因との関係が明らかになっていない。このため、 $\delta^{13}\text{C}_c$ については、環境復元に充分利用されずにきた。本研究では、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 変動シグナルと環境との関係、および $\delta^{13}\text{C}_c$ の主たる制御要因についてより詳細な研究を行うことにより、 $\delta^{18}\text{O}_c \cdot \delta^{13}\text{C}_c$ の同時解析方法を確立すること、およびその方法にもとづいて亜熱帯モンスーン地域の解析指標を得ることを目的として行った。サンゴ試料は、過去の研究が限られている南シナ海の海南島より採取した。

研究海域である南シナ海北部海南島東岸の Shalao 沖合の観測点で水温・塩分を

約1年にわたり自動現場観測し、 $\delta^{18}\text{Ow}$ 分析用海水を月1回採取した。さらにこの期間に成長したサンゴ骨格の $\delta^{18}\text{Oc}$ を高分解能で分析し、両者の対比を行った。その結果、 $\delta^{18}\text{Oc}$ は大局的には水温と塩分の変動に対応するものの、骨格の形成に適さないとされる条件下（水温 22°C 以下、塩分 27 以下）ではサンゴに記録が残らない時期があることが明らかとなった。これはサンゴ記録が連続的であると考えられてきた従来の考え方を覆す発見であった。この結果をうけ、記録欠損時期を考慮して復元することにより、この海域で見られる冬モンスーンによる水温低下パターン（12～2月）と、夏モンスーンによる降水の休止に伴う変動パターン（6月）によって特徴付けられるこの海域の環境変化を、より現実的に復元することができ、骨格に1月程度の間隔で時系列スケールを入れることが可能となった。水温や塩分の大きな変動に由来する $\delta^{18}\text{Oc}$ 記録の不連続や骨格成長量の季節変動は、亜熱帯・モンスーン海域のサンゴ記録パターンに広く影響を与えている可能性がある」と指摘した。ここで見いだした $\delta^{18}\text{Oc}$ 記録の限界は、同様の環境条件下にある海域でのサンゴ骨格の分析結果の解釈に新たな考慮を加える必要性を提起した。

$\delta^{18}\text{Oc}$ の研究で詳細な時間スケールを与えられた同一サンゴ骨格について $\delta^{13}\text{Cc}$ の変化要因の研究を行った。主要な制御要因と考えられている海水中の全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$ と海表面に達する光量について主に検討した。海水中の全炭酸の $\delta^{13}\text{C}$ は、前述の海水と同じ水試料を分析し、約月1回のデータを得た。光量に関しては Kubota *et al.* (2002) で報告された該当地域の月平均海面日射量データを用いた。海水中の全炭酸の炭素同位体比と $\delta^{13}\text{Cc}$ を対比した結果、両者の変動幅および変動パターンは大きく異なり、相関係数も非常に低かった ($R=0.16$)。従って、海水中の全炭酸の $\delta^{13}\text{Cc}$ は主たる制御要因ではないと結論づけた。一方、 $\delta^{13}\text{Cc}$ と海面日射量との間には非常に高い相関 ($R=0.75$) があり、変動パターンもほぼ一致することから $\delta^{13}\text{Cc}$ は主に光量により制御されていると結論づけた。

$\delta^{18}\text{Oc}$ および $\delta^{13}\text{Cc}$ の変動要因が明らかとなったため、実測記録との比較が可能な1990年代の骨格同位体比の分析を行い、気象要素との比較を行った。前述の詳細分析の結果により、本研究海域から得られたサンゴ骨格 $\delta^{18}\text{Oc}$ の変動パターンにはモンスーンによる季節変動パターンが保存されているため、これを時系列決定に利用した。一方、 $\delta^{13}\text{Cc}$ は主に光量によって制御されていることから、海面日射量との関係を検討した。その結果、6月の $\delta^{13}\text{Cc}$ は夏モンスーン中の降水休止期間の日射量を反映し、12～2月の $\delta^{13}\text{Cc}$ は冬モンスーンの北東風流入に伴う層雲形成で、日射量が低下する様子を反映していた。特に冬モンスーン期間の北東風は、その風が強いほど明らかに層雲の形成を促し、日射量を低下させる傾向が見られた。また、この北東風強度は、東南アジアにおける冬モンスーン強度の指標としてそのまま用いられることも多いことから、サンゴ骨格に記録された12～2月の $\delta^{13}\text{Cc}$ は、直接冬モンスーン強度を表している。この結果からサンゴ骨格の6月の $\delta^{13}\text{Cc}$ は夏モンスーン期間の降水小休止期の海面日射量を復元可能であり、12～2月の $\delta^{13}\text{Cc}$ は冬モンスーンの強度を表す指標として用いることを示した。

本研究で示した解析方法をさらに古い時代のサンゴ試料に適用することにより、過去のモンスーンの強度や変化を復元し、他の気候変動現象との関係をより詳しく解明できると期待される。

審査員一同は、この成果を高く評価し、また申請者が大学院博士過程において誠実かつ熱心に研究してきた実績と修得した単位数とを考慮した結果、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。