

学 位 論 文 題 名

Paleoenvironments of the Little Ice Age in the Caribbean Sea
using stable isotopes and trace elements in coral skeletons

(サンゴ骨格の安定同位体および微量元素を
用いたカリブ海における小氷期の古環境)

学位論文内容の要旨

1. 研究目的

近年、産業革命以降の地球規模の温暖化が危惧されているが、21世紀の気候変動を予測するためには、過去数百年間の気候変動を解明することが必要である。特に、熱帯域の海洋環境の復元は地球の気候システムを理解する上で非常に重要であるが、熱帯域の過去の気候変動の記録は少ない。熱帯・亜熱帯の海洋表層に広く生息するサンゴ骨格は、一年毎の年輪を形成しながら、数百年間成長するため、過去数百年間の海洋環境を高解像で復元しようとする際には有用な材料となる。

サンゴ骨格の酸素同位体比には水温と海水の同位体比(塩分)の変動が、Mg/Ca比には水温の変動が記録されており、両者を組み合わせることによって、水温と塩分のそれぞれを抽出することが可能となる。また、サンゴ骨格の炭素同位体比は海水の重炭酸イオンの炭素同位体比と体内の共生藻類の光合成等の代謝活動に由来する重炭酸イオンの炭素同位体比によって変動するために、当時の日射量や人為起源の二酸化炭素の影響、湧昇の強弱などが記録されていることになる。本研究では、まず、骨格の酸素・炭素同位体比と微量元素(Mg/Ca比)が、過去の水温・塩分・雲量等の指標となり得るかどうかを現場の気象データとの比較から検証することが、第一の目的である。また、16世紀から19世紀の小氷期と呼ばれ世界的に寒冷であったといわれているが、特に、18世紀初頭のマウンダー-氷期には太陽活動が低下し、これが全球的な寒冷化を引き起こしたといわれている。しかし、これらの復元につかわれた観測値または推測値は、ほとんどが陸上のものや、高緯度域のものである。そこで、サンゴ骨格を用いて、亜熱帯・熱帯域のカリブ海においても現在より寒冷であったかどうか、当時の古環境を復元することが第二の目的である。

2. 試料と方法

全長約 3 m のサンゴコア(*Montastrea faveolata*) がプエルトリコ南西海岸の水深 5 m の地点から、水中ボーリングによって採取された。次に、このサンゴコアから厚さ 4 mm の平板を切り出し、密度バンドを観察するために軟 X 線写真を撮影した。その密度バンドからは、このサンゴコアには 1665 年から 330 年間の記録が残されていることがわかった。その中で、現在の気象データとの対応をみるために 1987 年から 1993 年までの骨格部分とマウンダー氷期を含む 1699 年から 1703 年までの骨格部分について、酸素・炭素同位体比、微量元素(Mg/Ca 比)の測定を行った。その際の粉末試料採取には、サンゴ骨格の個体壁のみを抽出し、氷詰めにした後、 -20°C の低温室内でマイクロトームを用いて削り出すという方法(冷凍マイクロトーム法)を用いた、この試料採取法により、週レベルの高分解能分析が可能になった。また、サンゴ採取地点において、1996 年 11 月から 1998 年 1 月まで海水試料が採取され、海水の酸素同位体比と全炭酸の炭素同位体比の測定を行った。

3. 結果と考察

1. サンゴ骨格の Mg/Ca は、主に水温によって変動し、両者の間には次の関係式が見られる。 $T(^{\circ}\text{C}) = 3.16 \text{ Mg/Ca}(\text{mmol/mol}) + 13.23$ ($r = 0.96$)
2. サンゴ骨格の酸素同位体比から海水の酸素同位体比を差し引いた値は、水温によって変動し、両者の間には次の関係式が見られる。 $T(^{\circ}\text{C}) = -4.53 (\text{dc} - \text{dw}) + 7.23$ ($r = 0.93$)
3. サンゴ骨格の酸素同位体比から Mg/Ca より求めた水温を差し引くと、その変動($\Delta \delta^{18}\text{O}$; $\delta^{18}\text{O} - \text{Mg/Ca}$)は現場の降水の記録と対応する。一部、対応しない部分はオリノコ川の影響によると考えられる。
4. サンゴ骨格の炭素同位体比の変動は、現場の雲量の変動と対応する。このことから骨格の形成には共生藻類の代謝に由来する重炭酸イオンが主に使われていることがわかる。
5. 小氷期の 1700 年代の骨格の Mg/Ca から算出した水温は、1990 年前後よりも平均 2.0°C 低かったことを示す。
6. 産業革命以降の化石燃料の消費に伴う大気 CO_2 への ^{12}C の付加(Suess 効果)は、サンゴ骨格の炭素同位体比には認められない。この理由として以下の 3 つが考えられる。1) 300 年間で約 3 m のサンゴ群体の成長により、表面の日射量が増加し、共生藻類の活動が活発になった。2) この海域では小氷期の方が湧昇が強かった。3) 小氷期には赤道収束帯の季節による移動が、現在よりも北上していたため、雲量が多かった。
7. 1700 年代の骨格の $\Delta \delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O} - \text{Mg/Ca}$)の結果は、現在に比べて小氷期の表層塩分に明瞭な季節変化があったことを示唆する。

以上のように、本研究で、現在形成されたサンゴ骨格部分と気象データとの比較から、サンゴ骨格の Mg/Ca からは水温、酸素同位体比と Mg/Ca からは塩

分，炭素同位体比からは雲量が復元できることを検証し，また，1700 年代の小氷期はカリブ海においても，表層水温が現在よりも 2.0℃低く寒冷であったこと，復元された表層塩分の季節変化が大きく，雨期・乾期が現在よりも明瞭だったことを明らかにした．

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 場 忠 道

副 査 教 授 南 川 雅 男

副 査 助 教 授 長 谷 川 四 郎

副 査 講 師 王 律 江

副 査 教 授 岡 田 尚 武 (大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

Paleoenvironments of the Little Ice Age in the Caribbean Sea using stable isotopes and trace elements in coral skeletons

(サンゴ骨格の安定同位体および微量元素を
用いたカリブ海における小氷期の古環境)

サンゴ骨格には過去数百年間の環境変化が連続的に保存されている。本研究では、プエルトリコ産のサンゴ骨格の酸素・炭素安定同位体比、微量元素(Mg/Ca)を用いて、過去数百年で最も寒かったといわれている小氷期(Little Ice Age)におけるカリブ海の古環境を復元することを目的としている。そこで、まずは気象データとの対比が可能な 1990 年代の解析からこれらの指標の有効性を検討した。次に 1700 年代の小氷期についての解析を行った。本研究では試料採取に冷凍マイクロトーム法を用いて、週レベルの高分解能分析を行い、骨格中の酸素同位体比と Mg/Ca 比を組み合わせることによって、水温と塩分をそれぞれ復元することを可能にした。本研究の主な結果は次の通りである。

1. サンゴ骨格の Mg/Ca 比は、主に水温によって変動し、両者の間には次の関係式が見られる。 $T(^{\circ}\text{C}) = 3.16 \times \text{Mg/Ca (mmol/mol)} + 13.23$ ($r = 0.96$)
2. サンゴ骨格の酸素同位体比(δc)から海水の酸素同位体比(δw)を差し引いた値は、水温によって変動し、両者の間には次の関係式が見られる。 $T(^{\circ}\text{C}) = -4.53 \times (\delta c - \delta w) + 7.23$ ($r = 0.93$)
3. サンゴ骨格の酸素同位体比(δc)から Mg/Ca 比より求めた水温を差し引くと、その変動($\Delta \delta^{18}\text{O} = \delta c - T$)は現場の塩分の変化に対応する。その現場の塩分は降水とオリノコ川の影響によって変化している。
4. サンゴ骨格の炭素同位体比は、現場の雲量の変動と対応する。このことから骨格の形成には共生藻類の代謝に由来する重炭酸イオンが主に使われているこ

とがわかる。

5. 小氷期の 1700 年代の骨格の Mg/Ca 比から算出した水温は、1990 年前後よりも平均 2.0℃低かったことを示す。

6. 1700 年代の骨格の $\Delta \delta^{18}\text{O}$ ($\delta_c - T$)の結果は、現在に比べて小氷期の表層塩分に明瞭な季節変化があったことを示す。

7. 産業革命以降の化石燃料の消費に伴う大気 CO_2 への ^{12}C の付加(Suess 効果)は、サンゴ骨格の炭素同位体比には認められない。その原因として次の 3 つの可能性が考えられる。1) 300 年間で約 3 m のサンゴ群体の成長により、サンゴ群体表面の日射量が増加し、共生藻類の活動が活発になった。2) この海域では小氷期の方が湧昇が強かった。3) 小氷期には赤道収束帯の季節による移動が、現在よりも北上していたため、雲量が多かった。

以上のように、本研究では、現在形成されたサンゴ骨格部分と気象データとの比較から、サンゴ骨格の Mg/Ca からは水温、酸素同位体比と Mg/Ca からは塩分、炭素同位体比からは雲量が復元できることを検証し、また、1700 年代の小氷期はカリブ海においても、表層水温が現在よりも 2.0℃低く寒冷であったこと、復元された表層塩分の季節変化が大きく、雨期・乾期が現在よりも明瞭だったことを明らかにした。

審査員一同は、これらの成果を高く評価し、また研究者として誠実かつ熱心であり、大学院課程における研鑽や取得単位等も併せ、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。