



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Reconstruction of the past 100 years of ocean environmental change at Hawai'i using modern coral skeletons
Author(s)	内山, 遼平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16749号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16749
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99594
Type	doctoral thesis
File Information	Ryohei_Uchiyama_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 内山 遼平

学 位 論 文 題 名

Reconstruction of the past 100 years of ocean environmental change at Hawai‘i
using modern coral skeletons
(現生サンゴ骨格を用いたハワイの過去 100 年間の海洋環境復元)

北太平洋亜熱帯循環(North Pacific Subtropical Gyre, NPSG)の中央に位置しているハワイは、NPSG を構成する北赤道海流(North Equatorial Current, NEC)から分岐する海流や、西部太平洋の暖水をハワイまで運ぶハワイ風下反流(Hawaiian Lee Counter Current, HLCC)などが取り巻く環境下にある。しかし、観測記録は 20 世紀後半以降のものに限られており、長期的な海洋環境の実態は明らかになっていない。ハワイを含む亜熱帯域は、再解析水温に基づけば、過去 100 年間に於いて最も温暖化が進行した海域であることが示されているものの、直接的な根拠となり得る水温記録は限られている。

また、ハワイは表層の栄養塩が枯渇している北太平洋における生物生産を明らかにするための重要な観測地点でもある。ハワイ外洋の観測拠点 Station ALOHA における経過観察から、表層の栄養塩変動は、水温や水塊の混合強度に影響されることが明らかになっている。しかし、その観測期間はハワイ近海における水温の観測記録よりもさらに限定的である。

ハワイ諸島近海では年間を通じて北東貿易風の影響を受け、風上側と風下側で異なる海洋環境が形成される。風上側では貿易風に伴う蒸発冷却が顕著であるのに対し、風下側では局所的な湧昇など、異なる水温や栄養塩に関わるプロセスの存在が先行研究において指摘されている。このことから、ハワイの風上と風下における地理的な特性をふまえた議論が必要である。

サンゴが形成する炭酸カルシウム骨格中の微量元素比や安定同位体比は、過去の海洋環境を連続的かつ高時間解像度で復元できる古気候アーカイブである。本研究では、ハワイのサンゴ骨格を用いたマルチプロキシアプローチによって、北太平洋中央における過去 100 年間の水温変動、栄養塩変動、およびそれらを駆動する大気海洋相互作用を明らかにすることを目的とした。

はじめに、ハワイにおける水温を高い精度で復元するために、ハワイで採取した現生サンゴ骨格中のストロンチウム/カルシウム比(Sr/Ca 比)と現場水温を用いて、高精度な古水温計の導出を行った。これまで熱帯および亜熱帯域においてサンゴ骨格中 Sr/Ca 比は古水温を復元する指標として用いられてきたが、ハワイのサンゴ骨格を用いた有用な古水温計は未だ確立されていなかった。本研究により、世界で初めて古水温復元に有用な Sr/Ca 比-現場水温の関係式を導出した。

本研究で導出した古水温計を、オアフ島の東部(風上側)の Makai Pier と西部(風下側)の Ko‘Olina で採取した現生サンゴの長尺コアに応用し、サンゴ骨格中 Sr/Ca 比から過去 100 年間の水温を、月解像度以上の時間解像度で復元した。Makai Pier では 1908 年から 2019 年まで、Ko‘Olina では 1957 年から 2019 年にわたる長期的な水温記録を得た。復元水温から算出した平均的な季節変動は、一年を通して風上が風下よりも寒冷であった。また、Makai Pier には数年規模(1.6year/cycle、6.3year/cycle)および十年規模(15.5 year/cycle)の周期的な水温変動があった。さらに Makai Pier の復元水温は NPSG に沿った外洋の水温と同調しており、広い範囲での水平的な水温伝播が存在することが明らかになった。特に、Makai Pier における冬の水温は PDO 指数と同調しており、ハワイでは冬の時期に北太平洋の水温パターンが現れやすいことがわかった。また、夏(9月)

における水温の長期変化は、ハワイ諸島北東側の亜熱帯高気圧と負の相関をもっており、Makai Pier における水温は風による冷却効果の影響を受けていると考えられる。

KoʻOlina の復元水温にも数年規模 (2.0year/cycle, 3.6year/cycle) および十年規模 (17.0 year/cycle) の周期的な水温変動があった。しかしながら、KoʻOlina の水温は NPSG に沿った外洋の水温とは同調しておらず、鉛直的な海水の動きの存在が示唆された。Makai Pier (1909-2019 年) と KoʻOlina (1957-2019 年) の直線的な水温上昇率を算出した結果、Makai Pier の水温上昇率は約 $3.0^{\circ}\text{C}/\text{century}$ 、KoʻOlina では約 $2.8^{\circ}\text{C}/\text{century}$ であることが明らかになった。この水温上昇率は、サンゴ骨格中 Sr/Ca 比に基づく先行研究では報告されていないほどの高い水温上昇率である。先行研究では 20 世紀後半における貿易風の弱体化が報告されており、蒸発冷却の低下が Makai Pier における急激な水温上昇の一因であることが示唆される。

続いて、長期復元水温に見られた急激な水温上昇と長周期的な変動の要因を明らかにするために、サンゴ骨格中の安定窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$) を用いて栄養塩変動を復元した。 $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ は、栄養塩のトレーサーとして有用であり、海水の動きを捉えることができる指標である。結果、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ は Makai Pier で 0-8‰ の範囲で変動し、KoʻOlina では 1-7‰ の範囲で変動した。Makai Pier の $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ の増減の時期は、復元水温の短周期 (2-7 年) 成分と類似しており、水温が高い時期に $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ が低下する傾向があった。数年周期で発生する高水温時に、Makai Pier の海水の成層が強まり、窒素固定由来の栄養塩供給の寄与が増加することが考えられる。一方で KoʻOlina の $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ 変動は、北太平洋亜熱帯循環の強度を示す NPGO 指数と類似したパターンを示した。北太平洋亜熱帯循環が強い時期に、KoʻOlina の $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ が上昇する傾向があり、循環に伴う湧昇によって栄養塩が供給されていることを示唆した。Makai Pier $\delta^{15}\text{N}_{\text{coral}}$ は過去 100 年間にわたって低下傾向はなく、成層化の進行を示唆しなかった。そのため、Makai Pier の急激な水温上昇を説明する要因として、NPSG 上流側すなわちハワイ諸島北東域に由来する水塊自体が温暖化した可能性がある。一方、KoʻOlina では湧昇の存在が示されているのにもかかわらず、著しい温暖化が進行していた。このことは、湧昇による冷却効果を上回る規模で水塊自体の温暖化が生じていることを意味しており、西太平洋暖水プールの温暖化が影響している可能性が考えられる。

最後に、海水の鉛直的な動きや人為的な影響を明らかにするために、サンゴ骨格中バリウム/カルシウム比 (Ba/Ca 比) およびマンガン/カルシウム比 (Mn/Ca 比) の測定を行った。サンゴ骨格中の Ba/Ca 比は主に、中深層水の湧昇や、河川流量、陸域起源物質の指標として用いられる。サンゴ骨格中の Mn/Ca 比は主に、局所的な底質の変化、陸域起源物質、沿岸域での生物活動に影響を受けて、変動することが知られている。本研究では、超音波ネブライザーを接続した ICP-OES を用い、骨格内部の Ba/Ca 比や Mn/Ca 比を測定するための最適な前処理方法を確立した。ハワイのサンゴ骨格中 Mn/Ca 比は春から夏にかけて極大値を示す季節変動をもち、この時期に強度を増す貿易風による底質の攪乱を捉えている可能性がある。

以上より本研究は、次のような点で地球惑星科学分野を前進させた。(1) サンゴ骨格中の Sr/Ca 比を用いた水温復元により、過去 100 年間にわたって環境記録の空白域であった北太平洋中央における急激な水温上昇 ($2.8\sim 3.0^{\circ}\text{C}/\text{century}$) の直接的証拠を世界ではじめて示したこと。(2) サンゴ骨格のマルチプロキシアプローチにより、ハワイにおける急激な温暖化の要因が、貿易風の弱体化というリージョナルな気候変動だけでなく、NPSG 上流水塊と西部太平洋水塊の温暖化を捉えている可能性を示したこと。(3) 水温上昇率を上方修正した本研究成果は温暖化の解釈に新たな視座を与えることによって、大気海洋相互作用が強く現れるハワイの地理的特異性を明らかにしたこと、である。