

論文内容の要旨

論文題目 **Reconstruction of the Long-term Climate Variability
in the Tropical Western Indian Ocean from Kenyan Coral Record**
(ケニヤサンゴ記録による熱帯西インド洋長期気候変動の復元)

氏名 中村 修子

インド洋の気候変動は、これまで太平洋の ENSO とインド・アジアモンスーンとの関係で説明されてきた。しかし、1999 年 Saji, 山形らにより新しいインド洋の気候モードであるダイポールモード現象 (Indian Ocean Dipole: IOD) が発見された。正のダイポールモード (positive IOD) の年は、最盛期の 9-11 月にインド洋東西に高い水温と降水の偏差が現れる。すなわち西インド洋および東アフリカ沿岸では高水温・高降水が観測されケニヤやタンザニアなどに洪水などの被害が、東インド洋では湧昇により低水温、乾燥が観測されインドネシア周辺に山火事などが多発する。さらに IOD は、インド洋のみならず世界各地の気候に大きな影響を及ぼす。IOD 発見の後、東アフリカ降水や夏季のインドモンスーン降水への ENSO の影響について、それまでとは異なる描像が観測・モデル研究で明らかになってきた。しかしながら、IOD は過去 40 年程度の観測記録から明らかにされたもので、10 年スケールでの変動は不明であった。モデルの検証・将来予測のためにも過去の IOD 長期変動記録が求められていた。

熱帯浅海域に広く生息する造礁サンゴ (ハマサンゴ属) は数 100 年の長寿命で骨格に年輪を形成する。炭酸カルシウム骨格の同位体比や微量元素分析は様々な海洋環境情報を提供し観測記録以前の長期気候復元に有用である。このうち酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は海水温 (SST) や降水量の指標とされ、また紫外線照射で見られる蛍光バンドは河口付近のサンゴによく見られ、降水や洪水の指標とされる。熱帯インド洋のサンゴ年輪を用いた長期の気候復元研究もいくつか報告

されている。しかしながらそのほとんどが太平洋の ENSO と関連した海水温上昇・降水量増加の議論に終始していた。また多くのサンゴ年輪研究は、同位体比から得られた周期を NINO 指数と比較して関係を主張するのみで、個別の ENSO と IOD イベントやその季節進行を特定する研究はなかった。

こうした点をふまえて、本研究では西インド洋ケニアのサンゴ年輪を用いて、月単位酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) 解析から IOD の長期復元を行った。ケニアでは正のダイポールの年には 9-11 月にかけて高い降水量 (Short Rain) が観測され、これが positive IOD の pure シグナルとされる。本研究では、(1) 1887-2002 年の 115 年分の年輪をおよそ月単位で $\delta^{18}\text{O}$ 解析し、骨格密度・蛍光バンドの分析結果と合わせて年輪に季節の時間軸を導入する (Age model)。この $\delta^{18}\text{O}$ 変動から (2) ダイポールシグナルである Short Rain アノマリーを抽出し、coral IOD index を作成する。(3) 作成した coral IOD index を観測記録と評価し、全サンゴ記録に適用して 115 年間の IOD を復元し、過去の IOD 変動を解明する。最後に (4) インド洋熱帯域の他のサンゴ研究に IOD や ENSO のシグナルが現れているかを本研究と同様の解析手法で検討して、インド洋の気候変動とそのモード変調を考察した。

(1) Age model および coral IOD index

独立した指標である骨格密度・蛍光バンド・coral $\delta^{18}\text{O}$ を同一年輪上で解析し、coral $\delta^{18}\text{O}$ の最高値を低水温の 8 月、および骨格の低密度から高密度バンドの明瞭な境界を 11 月とする age model を作成した。すると coral $\delta^{18}\text{O}$ の年変動は水温の季節サイクルに対応するが、1 月に相当する同位体比に前年の Short Rain アノマリーを反映していることを見出し、この $\delta^{18}\text{O}$ 値を抽出して coral IOD index とした。作成した coral index は観測のダイポール指標である Mombasa rain (9-11 月平均) とよく一致した (1986-1999 年 $r = -0.77$)。この相関は 1959-1999 年の 40 年間では $r = -0.58$ と弱まるが、index から観測 IOD 年のみを抽出すると Mombasa rain と $r = -0.83$ と高い相関を示し、IOD シグナルの高降水・低降水をよく表していた。coral $\delta^{18}\text{O}$ から 1 月の水温を差し引いた残差 $\delta^{18}\text{O}$ は、降水量をより表すと期待されたが、実際には Mombasa rain との相関が coral index よりも低くなったため、coral index を IOD index とした。

(2) 1887-2002 年の Coral IOD 変動

こうして得られた coral IOD index によって、過去 115 年間の IOD 変動の復元に成功し、15 回の positive IOD, 8 回の negative IOD event を特定した。その結果、1924 年以前には 10 年に 1 回程度だったダイポールモードの周期が 1924 年以降短くなり、1990 年代以降は約 2 年に 1 回と頻発し規模も大きくなっているモードシフトが起きていることが確認された。これは西インド洋の水温上昇と対応しており、この水温上昇が最近の IOD の頻発の引き金になっていると

考えられる。

IOD の活発化に伴って、インド洋での ENSO・インドモンスーン降水との関係も変化した。IOD が 10 年周期であった 20 世紀前半には太平洋の ENSO がモンスーン降水と強くカップリングし、インド洋と周辺の気候に優勢であった。しかし 20 世紀後半には IOD が頻発化してモンスーン降水と強くカップリングし、その陰に ENSO の影響が隠れる結果を示した。

(3) ENSO 季節シグナル

このケニヤのサンゴ年輪が太平洋の ENSO シグナルを記録しているかを検討した。115 年間の酸素同位体比記録について、IOD・ENSO・通常年に分けて季節変化を重ね合わせる手法により、 $\delta^{18}\text{O}$ ピークの出現パターンを比較した。太平洋の El Niño の影響は 1 シーズン(約 4 ヶ月)遅れでインド洋に現れるとされており[Xie et al., 2002], El Niño のシグナルがケニヤのサンゴに現れると期待される季節は発生翌年(year +1)の 3-5 月と仮定した。またシグナルとしては、Basin mode SST warming と Long Rain anomaly を仮定した。

この結果、ENSO の影響が西インド洋に現れると仮定した発生翌年 (year +1) の 3-5 月には El Niño および La Niña に特異なパターンは見いだせず、SST 上昇・降水(Long Rain)偏差の変化といった ENSO の影響は現れなかった。

しかしながら El Niño 発生の前年から直前まで、 $\delta^{18}\text{O}$ が重くなる傾向が見られた。これは Negative IOD と類似の低水温の状態を示し、El Niño 発生前の低水温の状態は 19 世紀末に顕著であり、20 世紀を通して減衰する。これらの結果は、前年から直前のケニヤでの低水温状態が太平洋の El Niño 発生に何らかの影響を与える可能性、またこの condition が 20 世紀の温暖化により弱まってきたことが El Niño の発生と性質を変えてきている可能性も示唆している。

(4) 熱帯インド洋の他海域からのサンゴ記録

Cole et al. [2000]と同様に、ケニヤサンゴの年平均 $\delta^{18}\text{O}$ データを用いて、NINO3.4 との cross coupling 解析を行った。この結果は 4-5 年周期でのごく弱い coherence を見せたが、既に季節解析においてケニヤサンゴには El Niño シグナルが現れないことが示されており、この coherence は pre- El Niño シグナルとの一致を表す可能性がある。

Abram et al. [2008]は 西インド洋 Seychelles と東インド洋 Mentawai の長期サンゴ記録を用いて、東西の水温差をベースにした IOD index を作成した。東インド洋では positive IOD 年は湧昇による SST 低下がシグナルとされる。この index から 20 世紀中頃に IOD が強まり頻度が高まっている結果を得ている。ケニヤの coral IOD index の結果と比較すると、20 世紀後半(1950-1960 年代)でのモードシフトが共通であるがシフトは穏やかである。また 20 世紀前半(1924)のシフトはケニヤでのみ確認された。

Seychelles と Mentawai の月別 coral $\delta^{18}\text{O}$ 変動を個別にケニヤと同じ季節シグナルの重ね合わせの方法により比較した。この結果、Seychelles では positive IOD の水温上昇を認めたが、negative IOD のシグナルは出なかった。ENSO については、basin-mode SST warming を確認するが、pre-El Niño シグナルは見られない。一方、Mentawai では明確な positive/negative IOD シグナルが見られず、115 年間で特に強い 3 回の positive IOD 年(1961, 1994, 1997 年) の強い湧昇を捉えるのみだった。代わりに basin-mode SST warming が Seychelles よりも強く現れた。また pre-El Niño signal はケニヤと同じ cool SST condition となった。これらの結果から、ENSO の影響がインド洋東部から西部にかけて広まるがケニヤ沿岸には及ばないこと、一方 IOD の影響はインドネシア側よりも西インド洋・東アフリカで優勢であることが示された。またインド洋東西の両サンゴ記録から 20 世紀を通したモードシフト(ケニヤサンゴ IOD, Mentawai サンゴの湧昇記録の時系列変化)を示した。

この研究では、気候モードの議論にはその季節性が重要であり、サンゴ年輪の月単位の解析を行い季節シグナルを指標として用いることで、年毎に気候モードを特定・復元することが可能であることを示した。こうしたアプローチによって、気候ダイナミクスと古気候研究をつないで、長期的な気候モードの変調の復元や気候モデルの検証・予測に活用することができる。