

# 九州・パラオ海嶺の海洋コア年代推定 ~安定同位体比によるアプローチ~

松井 浩紀<sup>\*1</sup> 池原 Matsui Hiroki Ikehara M

池原 実<sup>\*1</sup> Ikehara Minoru 堀川 恵司\*2 Horikawa Keiji

恵司<sup>\*2</sup> 岡崎 a Keiji Okaza

#### 岡崎 裕典<sup>\*3</sup> Okazaki Yusuke

## 1. はじめに:海洋コア

世界の海底に降り積もった堆積物から得られる連 続柱状試料を海洋コアと呼びます。海洋コアを詳細 に解析することで,過去から現在にいたる地球環境 変動(例えば海水温や全球の氷床量の変化)を解明 することが可能となります。海洋コアのように過去 の地球環境変動を記録する試料には他に極域のアイ スコア,浅い海のサンゴ礁、樹木の年輪等があります。

海洋コアは,海洋観測船や深海掘削船による研究 航海において採取されます。100 m 以上の海洋コア を採取できる科学的な深海掘削の開始は,1968 年 の深海掘削計画 (DSDP) に遡ります。その後,国 際深海掘削計画 (ODP, 1985~2003 年)と統合国際 深海掘削計画 (IODP, 2003~2013 年) を経て, 2013 年以降の国際深海科学掘削計画 (IODP) に引 き継がれています。

今日まで 50 年以上, 深海掘削試料はコアレポジ トリーで適切に管理され, 多数の研究に供されてき ました。現在は IODP の枠組みの下, 日米欧の世界 3 か所のコアレポジトリーで保管・管理されていま す。高知コアセンター(高知大学と海洋研究開発機 構(JAMSTEC)が共同で運営する研究施設)はコ アレポジトリーの一角として,海洋コアの保管・管 理の任務を果たしつつ, コア試料を用いた研究を推 進しています(**写真 1**)。

筆者らの研究グループは,高知コアセンターで保 管されているレガシー試料(後述)に着目し,微小 な化石(微化石)の産出状況と安定同位体比を基に, 北西太平洋の海洋コアの年代モデルを47年ぶりに 再編しました<sup>1)</sup>。ここで年代モデルとは,海洋コ アのどの深さがどの年代に相当するかを推定した 曲線です。本稿では,同位体を用いた年代推定の原 理と全体の研究成果について紹介します。

## 2. レガシー試料 : Site 296 地点

レガシー試料とは、1968 年から 2003 年までの深 海掘削(DSDP/ODP) 試料の通称です。2003 年以 降の IODP 試料と同様に、過去に採取されたレガ シー試料も地球環境変動の解明に欠くことができま せん。今回、筆者らの研究グループは、1973 年の DSDP 第 31 次航海によって掘削された Site 296 地 点の海洋コアを対象としました(コア長約 300 m) (図 1)。



**写真1 高知コアセンターのコアレポジトリー** 太平洋西部とインド洋の深海掘削試料が冷蔵室で保管・管理されています。



図1 Site 296 海洋コアの採取地点

Site 296 地点(北緯 29 度 20 分, 東経 133 度 31 分, 水深 2920 m)は、九州付近から沖ノ鳥島を経てミ クロネシアのパラオ付近にいたる南北 3.000 km に わたる海底山脈である九州・パラオ海嶺の北端に位 置しています (図1)。Site 296 海洋コアは黒潮流路 の近くで採取されたため、黒潮の長期的な変遷を記 録した試料として期待されていました。同試料は微 化石の産出量や保存状態も良いため、微化石の骨格 を対象とした先端的な同位体分析が可能であり、北 太平洋中緯度域では最良と見られる試料でした。し かし、1973年当時の掘削技術のためコア回収率が 低く,従来の年代モデル2)の不確実さも大きいため, 海洋コア試料の連続性の評価について詳細な解析が 必要でした。そこで、Site 296 海洋コアの微化石の 産出状況を改めて精査し、新たに同位体分析も行う ことで、年代モデルの改訂に取り組みました<sup>1)</sup>。

### 3. 同位体を用いた年代推定の原理

同位体を用いた年代推定は,放射性同位体による 方法(例えば放射性炭素年代測定)と安定同位体に よる方法に大別されます。本稿で紹介する安定同位 体は, Harold Urey による同位体分別の理論的な計 算<sup>30</sup>以来,海洋コア試料の年代推定・古海洋環境復 元に活発に利用されてきました。その歴史は深海掘 削の歴史より約 20 年長く,両者は相乗効果で発展 してきました。以降は特に、ストロンチウム安定同 位体比( ${}^{ss}Sr/{}^{ss}Sr$ )、炭素・酸素安定同位体比( $\delta {}^{1s}C$ 、  $\delta {}^{1s}O$ )を用いた年代推定について紹介します。な お $\delta$ (デルタ)は標準物質に対する相対的な差を示 し、 $\delta$ 値が大きいほど重い同位体( ${}^{1s}C$ ,  ${}^{1s}O$ )の存 在比が大きいことを示します。

Sr の海洋における滞留時間は約 200 万年間であ り、海洋循環の時間スケール(数千年)に比較して 非常に長いことが知られています。このため、現在 の <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr は全海洋で同一の値を示します。また、 海水の <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr は海生生物に同位体分別なく記録さ れます。これらの原理を利用して、過去 5 億年間の <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr スタックカーブ(複数地点のデータを統合 した単一の曲線)が求められています<sup>4</sup>。

海水の<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr は主に大陸地殻由来と上部マント ル由来のSrの割合に応じて決定されます。したがっ て<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr スタックカーブは過去の造山運動や海洋 底拡大速度の変化等を反映して変動します。年代推 定には、未知試料の<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr を測定し、絶対値や変 動パターンをスタックカーブと比較します。特に過 去 4,000 万年間は<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr スタックカーブが単調増 加の傾向を示すため、高精度の年代推定が可能とな ります。

海生生物が記録する $\delta^{13}$ C(炭酸塩 $\delta^{13}$ C)は海水 の溶存無機炭素の $\delta^{13}$ Cを反映します。後者の $\delta^{13}$ C 変動は主に全球の炭素循環に影響されます。すなわ ち、地球の炭素リザーバー(貯蔵庫)である大気・ 海洋・植生・土壌・堆積物・岩石の間で炭素が交換 されることによって $\delta^{13}$ Cは変動します。また、光 合成は軽い炭素( $^{12}$ C)を優先的に固定するプロセ スであり、有機物の生成や埋没も炭酸塩 $\delta^{13}$ Cの変 動要因となります。 $\delta^{13}$ Cは $\delta^{18}$ Oよりも堆積後の続 成作用による変質を受けにくいため、 $\delta^{13}$ C分析は 固結試料にも適用されています。

海生生物が記録する $\delta^{18}$ O(炭酸塩 $\delta^{18}$ O)は海水 の $\delta^{18}$ O(主に全球の氷床量)と海水温を反映します。 海水の蒸発は軽い酸素( $^{16}$ O)から,降水は重い酸 素( $^{18}$ O)から始まるため,氷床に記録される $\delta^{18}$ O は小さい値を示すことが知られています。このため, 氷床量が増加(減少)すると海水の $\delta^{18}$ O,したがっ て炭酸塩 $\delta^{18}$ Oは大きい(小さい)値となります。 一方で熱力学的な関係から,海水温が低下(上昇) すると炭酸塩 $\delta^{18}$ Oは大きい(小さい)値となります。



写真 2 δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O 分析に用いられる底生有孔虫化石

これらの原理から,海水の塩分や堆積後の続成作用 等考慮する必要はあるものの,炭酸塩δ<sup>18</sup>Oは全球 的な寒冷・温暖傾向を反映して変動します。

δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O共に, 微小な底生生物である底生有 孔虫化石(**写真 2**)の分析から, 過去1億年間のスタッ クカーブが構築されています<sup>50</sup>。未知試料のδ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>Oを測定し, スタックカーブと絶対値や変動パ ターンを比較することで年代の推定が可能です。底 生有孔虫δ<sup>18</sup>Oによる年代推定は過去 530 万年間の 海洋コアに非常によく適用されています<sup>60</sup>。

#### 4. 年代モデルの構築と検証

Site 296 海洋コアの従来の年代モデルは,船上報告の微化石の産出状況に基づいています<sup>2)</sup>。ここで 微化石とは,顕微鏡で観察可能な海洋プランクトン の化石であり,特徴的な形態の種が広範な海洋に出現/絶滅するために,示準化石として海洋コアの堆積年代を推定することができます。筆者らの研究グ ループは,Site 296 海洋コアの微化石(石灰質ナンノ化石,浮遊性有孔虫,放散虫)の産出状況を再検討しました(図2)。その結果,過去 2,000 万年間に わたる連続的な年代推定を行うことができました。

微化石(特に石灰質ナンノ化石)から構築した年 代モデルを検証し,更に高精度化するため,次に本 研究で測定した浮遊性有孔虫化石<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Srをスタッ クカーブ<sup>4)</sup>と比較しました(図3)。わずかな違い を除き,測定データの絶対値・変動パターン共にス タックカーブと一致しました。この結果は,微化石 年代モデルの信頼性が高いことを示しています。本



図2 微化石年代推定

研究は更に,測定データの変動曲線とスタックカー ブについてソフトウェア MATCH<sup>71</sup> を用いたマッチ ングを行い,微化石と<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr の統合年代モデルを 構築しました。

統合年代モデルの信頼性を検証するため. 底生有 孔虫化石について測定したδ<sup>13</sup>C とδ<sup>18</sup>O の変動を赤 道太平洋のスタックカーブ 5と比較しました(図4)。 δ<sup>13</sup>Cの変動は約2.000~800万年前までスタック カーブとおおむね一致しており、Site 296 海洋コア が記録する北太平洋のδ<sup>13</sup>Cと赤道太平洋のδ<sup>13</sup>Cが 同期して変動していたことが分かります。しかし約 800 万年前以降について Site 296 の δ<sup>13</sup>C がスタック カーブよりも少し大きい値(差は0.5%以下)を示 しました。このことは北太平洋と赤道太平洋の間で 約800万年前に海洋深層環境の違いが生じたこと、 特に海洋循環の変化®を反映している可能性があり ます。一方で、δ<sup>18</sup>Oの変動は過去 2,000 万年間を 通じてスタックカーブと一致しました。すなわち, 北太平洋と赤道太平洋のδ<sup>18</sup>0 が同調して変動して おり、全球的な氷床量の変動と深層水温の変化を反 映していると考えられます。これは統合年代モデル の正確さを強く支持する結果です。



#### 図 3 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 年代推定

ひげ付き白丸と黒線が今回の測定データ、灰色の線が<sup>55</sup>Srスタックカーブを示します。



図 4 δ<sup>13</sup>C, δ<sup>18</sup>O 年代推定

黒ダイヤと白丸が今回の測定データ、灰色の線が赤道太平洋のスタックカーブを示します。

#### 5. まとめ:過去の温暖期の環境変動

Site 296 地点における微化石の産出状況を再解析 し,新たに安定同位体比分析を行うことで,掘削当 時は確立されていなかった Site 296 海洋コアの統合 年代モデルを構築することができました<sup>1)</sup>。その結 果, Site 296 海洋コアが過去 2,000 万年間を通じて 連続的に堆積した貴重な試料であることを明らかに しました(図5)。中期中新世に相当する 1,600~1,160 万年前について,従来の船上報告では海洋コアが連 続的でない可能性が示唆されていましたが<sup>20</sup>,本研 究により,Site 296 海洋コアの連続性が示されまし



図 5 Site 296 海洋コアの年代モデル

白丸と実線が新たな統合年代モデル, 灰色丸と破線が船上報告の年代モ デルを示します。

た。今回確立した年代モデルでは約2,000~500万 年前について1,000年に0.5~2 cm ずつ,約500万 年前以降について1,000年に2~4 cm ずつ堆積した と推定されます。

北太平洋中緯度域では過去 2,000 万年間を通じて 連続的な堆積物は報告例がなく, Site 296 地点は同 海域を代表する海洋コアになると考えられます。し たがって, Site 296 地点は北太平洋の複数の海洋コ アを対比する際のリファレンスサイト(標準的な地 点)となることが期待されます。更に, Site 296 海 洋コアを詳細に調べることで, 黒潮をはじめとする 北太平洋海洋循環の長期的な変遷史を探ることも可 能となります。特に,過去 3,000 万年間において最 も温暖な時代であったとされる中期中新世につい て,連続的な北太平洋の海洋環境変動を復元できる 可能性が高いと考えられます。なお 1973 年当時の 掘削技術に起因するコア回収率が低い課題(図5) については、将来的な Site 296 地点の再掘削により 回収率の高い連続的な海洋コアの採取を期待できま す。

本研究成果は、海洋コアの年代推定に安定同位体 比によるアプローチが有効であることを実証するも のです。また、過去に採取されたレガシー試料の有 用性、科学掘削の開始から 50 年以上にわたり試料 の適切な保管・管理を続けているコアレポジトリー の重要性を広く示すものです。今後もレガシー試料 が活用され、海洋コア研究が進展することが期待さ れます。

#### 参考文献

- Matsui, et al., Newsletters on Stratigraphy, 53, 313-331, DOI: 10.1127/ nos/2019/0549 (2020)
- Ingle, et al., Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 31, 191-274, DOI: 10.2973/dsdp.proc.31.107.1975 (1975)
- 3) Urey, Journal of the Chemical Society, 1947, 562-581, DOI: 10.1039/JR9470000562 (1947)
- 4) McArthur, et al., in The Geologic Time Scale 2012, 127-144, DOI: 10.1016/B978-0-444-59425-9.00007-X (2012)
- 5) Cramer, et al., Paleoceanography, 24, PA4216, DOI: 10.1029/2008PA001683 (2009)
- 6) Lisiecki and Raymo, *Paleoceanography*, 20, PA1003, DOI: 10.1029/2004PA001071 (2005)
- Lisiecki and Lisiecki, *Paleoceanography*, **17**, 1049, DOI: 10.1029/2001PA000733 (2002)
- 8) Poore, et al., Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 7, Q06010, DOI: 10.1029/2005GC001085 (2006)

(\*1高知大学海洋コア総合研究センター,\*2富山 大学学術研究部理学系,\*3九州大学大学院理学研 究院)