

ネオジム同位体比を用いた日本海の海洋循環構造の解析：
現代の海水と過去 1000 万年間の魚歯化石への適用

小坂由紀子（富山大学 大学院理工学教育部 地球生命環境化学専攻）

1. はじめに

現在の日本海は最大水深 3500 m に達する日本海盆を有している一方、狭く浅い海峡 (< 200 m) によって外洋と隔離されており、海水の交換が制限された半閉鎖的な環境になっている。このため、外洋の海水の交換は表層に限られ、独立した深層水循環を持ち、約 300 m 以深は溶存酸素量に富んだ日本海固有水と呼ばれる、ほぼ均質な海水で占められている (Senju et al., 2005)。大陸と陸続きだった日本列島が大陸から離れるように移動し、日本海が形成され始めた約 1640 万年前以降 (小笠原, 2011)、現在のような海洋環境がどのように形成されたかについては、これまで多くの研究で議論されてきた。放散虫群集解析からは、800 - 350 万年前については北太平洋に類似した群集であったのに対し、350 万年前以降から外洋と異なる特異な群集へと変化したことが示唆されている (上栗・本山, 2007)。この他にも、深層の酸化還元状態と表層水温の変化や底生有孔虫の出現・消滅をあわせて検討した研究例があるが、底層水の溶存酸素量の変化については複数の仮説があり、その検証が課題となっている (Tada, 1994; 花方ら, 2001)。このように多くの研究がされてきたにも関わらず、議論が収束しないのは日本海の特徴が原因である。その一つに日本海は炭酸塩補償深度が浅いことが挙げられる。水深の深い海域では古海洋復元に有用な炭酸塩殻からなる有孔虫殻が溶けてしまうため、長期間連続して産出する微化石が限られていることが、古海洋環境研究に大きな制約を与えている。この制約によって、日本海の海洋堆積物試料から得られる情報は定性的なものに偏っており、定量的なデータが不足している。

そこで本研究では、炭酸塩補償深度に関係なく海底堆積物中に保存される魚歯化石から、過去の海水のネオジム同位体比を復元し、定量的なデータから過去の海洋循環構造の推察を試みた。海水のネオジム同位体比は、海水の起源の情報を持っており、魚歯・骨片化石は深層水のネオジム同位体比を記録し保存するという特徴を持っている。このため、魚歯化石のネオジム同位体比を分析することで、過去の深層水の起源の情報を復元することができる。この手法を日本海の海洋堆積物試料に適用し、日本海形成中期 (1000 万年前) 以降、日本海に流入する中深層水の起源の変化を推察した。過去の中深層水の起源の変遷を既存の知見に加え、日本海の海洋環境が全球規模の気候変化と海峡の閉鎖性に対して、どのように応答していったかの復元を試みた。また、過去の変遷の議論の起点となる現代の日本海の海水のネオジム同位体比の測定を試みた。

2. 研究試料

統合国際深海掘削計画 (IODP) 346 次航海で採取された海底堆積物試料 Site U1425 Hole D を用いた (水深 1909 m, 採取地点は図 1 に★で示した)。掘削コア試料のうち, 過去 1000 万年間相当 (コア深度約 370 m) からほぼ等間隔で分取した 200 試料を研究対象とした。また, 海水試料は深海調査研究船「かいれい」KR-15-10 次航海において若狭湾沖で表層水と深層水を計 8 試料採取した。

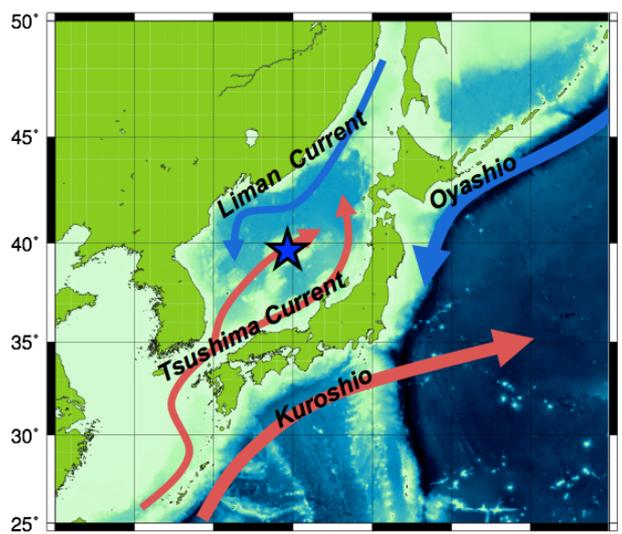


図 1. 海洋堆積物試料の採取地点と主要な表層海流

3. 結果と考察

本研究では 200 試料の堆積物試料のうち, 113 試料から魚歯化石を拾い出し, 計 32 試料からネオジム同位体比データを得ることができた。堆積物試料の深度に対する体積年代は古地磁気データ, 生物層序から構築された年代モデルを用いた。

640 – 450 万年前の期間は, 魚歯化石の産出頻度が低く, ネオジム同位体比データを得ることができなかった。この期間の海水のネオジム同位体比の変化については, 逐次抽出法で鉄-マンガン酸化物を溶出させ, そのネオジム同位体比を分析した。酸化物のネオジム同位体比は, 海水のネオジム同位体比を記録しているプロキシのひとつだが, その抽出過程で他の成分を溶かし込んでいる可能性があるため, 海水のネオジム同位体比として単純に扱うことができない。そこで, 本研究では酸化物のネオジム同位体比データの妥当性を検討したうえで, 海水のネオジム同位体比の変化の傾向に制約を与えるために活用した。

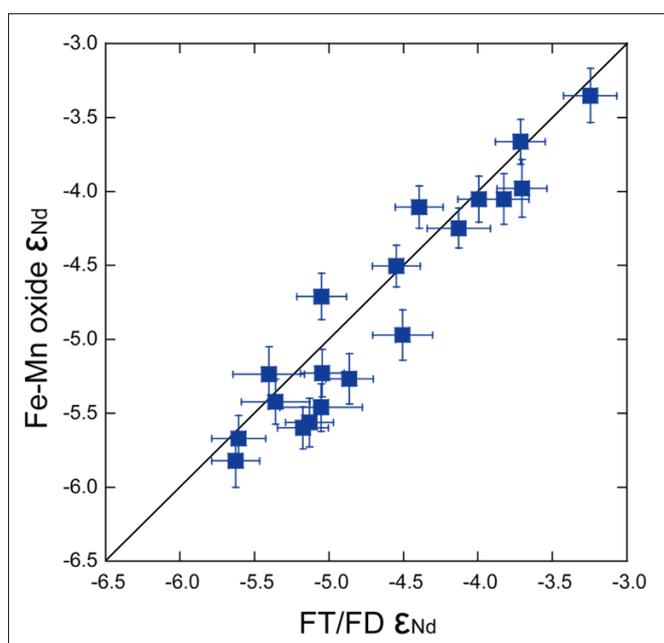


図 2. 同層準で測定した魚歯化石のネオジム同位体比 (FT/FD ϵ_{Nd}) と鉄-マンガン酸化物のネオジム同位体比 (Fe-Mn oxide ϵ_{Nd}) のプロット。エラーバーは測定誤差の 2 倍の範囲を示している。直線は 1 : 1 を示しており, 両者のネオジム同位体比がほぼ同じ値であれば, 直線が両者のエラーバーの範囲内に含まれる。

魚歯化石のネオジウム同位体比と鉄-マンガン酸化物のネオジウム同位体比を図 2 に示した。1 : 1 に近い関係であることが見て取れるが、直線から遠い位置にプロットされているデータもあり、魚歯化石のネオジウム同位体比から鉄-マンガン酸化物のネオジウム同位体比を引いた差は最大+0.47 ϵ_{Nd} 、最小-0.34 ϵ_{Nd} であった。鉄-マンガン酸化物のネオジウム同位体比が魚歯化石のネオジウム同位体比より高い値を示すことは、火山灰など比較的新しい岩石を抽出過程で溶かし込んでいる可能性がある。一方、低い値を示すことは、黄砂など比較的古い岩石を溶かし込んでいる可能性を示唆している。この不確実性を踏まえた上で、暫定的に大きく見積もった $\pm 0.5 \epsilon_{Nd}$ のエラーバーを鉄-マンガン酸化物のネオジウム同位体比データとともに示し、水色の網掛けでその範囲を示した (図 3)。

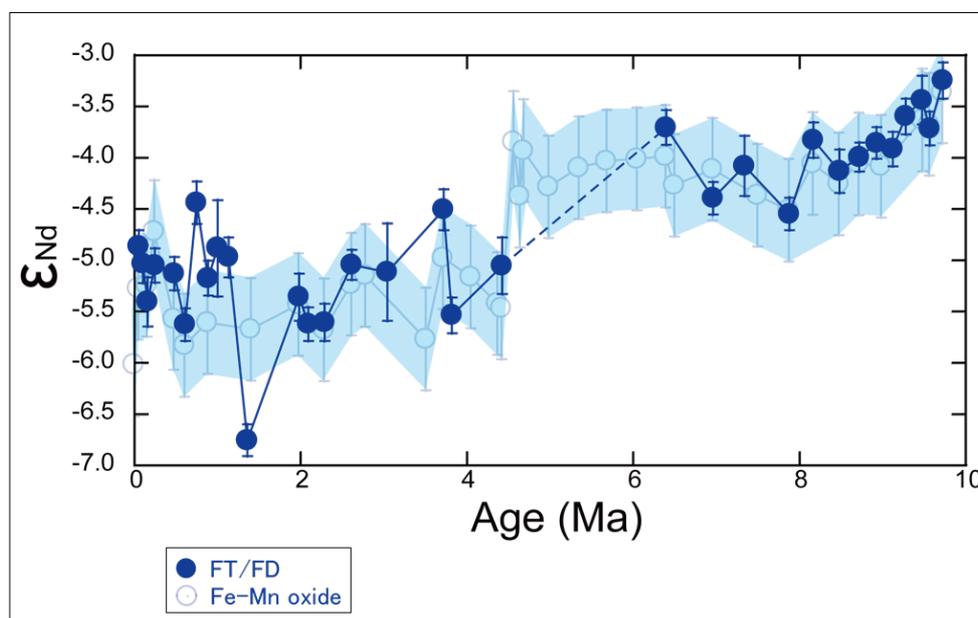


図 3. 過去 1000 万年間の海水のネオジウム同位体比の変遷 (●) と鉄-マンガン酸化物のネオジウム同位体比 (○), 及びそれから見積もった海水のネオジウム同位体比の変化傾向 (■水色網掛け)。横軸の Ma は 100 万年単位で時代を示している。

図 3 の鉄-マンガン酸化物のネオジウム同位体比から見積もった、海水のネオジウム同位体比の変化傾向から、魚歯化石の産出しなかった時期における変化が概ね減少傾向にあることが推察される。この研究対象とした期間でネオジウム同位体比の減少は 1000 - 850 万年前の期間と 640 - 450 万年前に顕著にあったと見て取れる。この減少傾向から、1000 万年前には親潮に類似した亜北極域を起源とする海水が日本海の深層に存在していたこと、また地殻変動によってその亜北極域を起源とする海水の流入量が減少し、徐々に現在のような低いネオジウム同位体比を持つ対馬暖流に類似した南方を起源とする海水が流入する環境に変化してきたと考えられる。しかし、ネオジウム同位体比が約 $-5.0 \epsilon_{Nd}$ に達した時期 (450 万年前) は、放散虫の群集解析から示唆された対馬暖流の流入時期 (220 万年前以降, 上栗・本山, 2007) や、有孔虫の群集解析から示唆された対馬暖流の流入時期 (170 万年前以降, Kitamura,

Kimoto, 2006) より早いため、対馬暖流以外に日本海の深層のネオジム同位体比を低くさせる他の要因（大陸からの風化や河川水の供給など）が存在した可能性があることが示唆された。

本研究で復元した海水のネオジム同位体比は日本海の水深 1909 m の深層水のデータであるため、同様の傾向が日本海全域、あるいはどの水深まで見られる現象であるかなどを議論する上ではデータが不十分である。また、本研究で得られた Site U1425 コアのネオジム同位体比データが日本海の発達史を議論する上で最適であるか検討するためにも、今後日本海の他の地点の掘削コアを用いて同様の分析を進める必要があると考えている。

海水試料のネオジム同位体比分析については、Francois et al. (2013), Amakawa et al.(2000)を参考に前処理方法の確立及びネオジム同位体比の分析を目指したが、回収できたネオジム量が少なく同位体比の測定ができなかった。しかし、ネオジム濃度の高い深層水試料については数十 ng のネオジムを回収することができており、濃縮操作に問題はなかった可能性が高い。このことを踏まえ、今後濃縮した試料溶液からネオジムを回収する方法を再検討し、再度前処理を行い、海水試料のネオジム同位体比を測定する。