

ネオジム同位体比から明らかになった日本海の形成史

堀川 恵 司

（富山大学 学術研究部理学系）

1. 日本海の形成過程

これまでに分かっている日本海の形成過程や日本列島の形成史によれば、かつて日本列島はユーラシア大陸の一部で、約 2500 ～ 2000 万年前に日本列島とユーラシア大陸の間に溝が形成され、それが徐々に拡大し、今の日本海の原型が形成されたようです。日本海の拡大が終息した 1000 万年前には、日本列島の分布は現在の弧状に近い配置になっていましたが、西日本は朝鮮半島と陸続きで、東日本の大部分は海面下にあったようです。当時の日本海は、日本列島によって閉ざされた現在のような半閉鎖的な縁海ではなく、東側に大きく開いた湾のような形状をし、日本海と太平洋との間で表層水や深層水を交換していたとされています。しかし、1000 万年前以降、東日本～北海道地域が徐々に隆起し、太平洋と日本海の間にあった海峡が徐々に縮小・浅海化して、現在のような半閉鎖的な日本海が作られました（図 1）。

日本海が太平洋と分離し、閉鎖的になっていく過程は、東北日本の隆起活動や日本列島の形成と密接に関係していますが、いつ頃、そしてどの程度の時間スケールで起こったか、については実はよく分かっていませんでした。そこで、著者らは「海水の由来」を判別できるネオジム（ネオジウムとも表記する）同位体比に着目して、日本海の閉鎖時期を解析することにしました。これは、東北日本の隆起活動によって日本海が閉鎖的になれば、太平洋からの海水の流入が制限されるため、日本海深層水の化学組成が太平洋と異なるようになる、この変化をネオジム同位体比から明らかにできるのではないかと考えたからです。

2. 海水の由来が分かるネオジム同位体比

海水中には、大気から供給されるダスト粒子の溶脱や、岩石の風化、海底熱水からの供給など、様々な経路から様々な元素が供給され、蓄積して

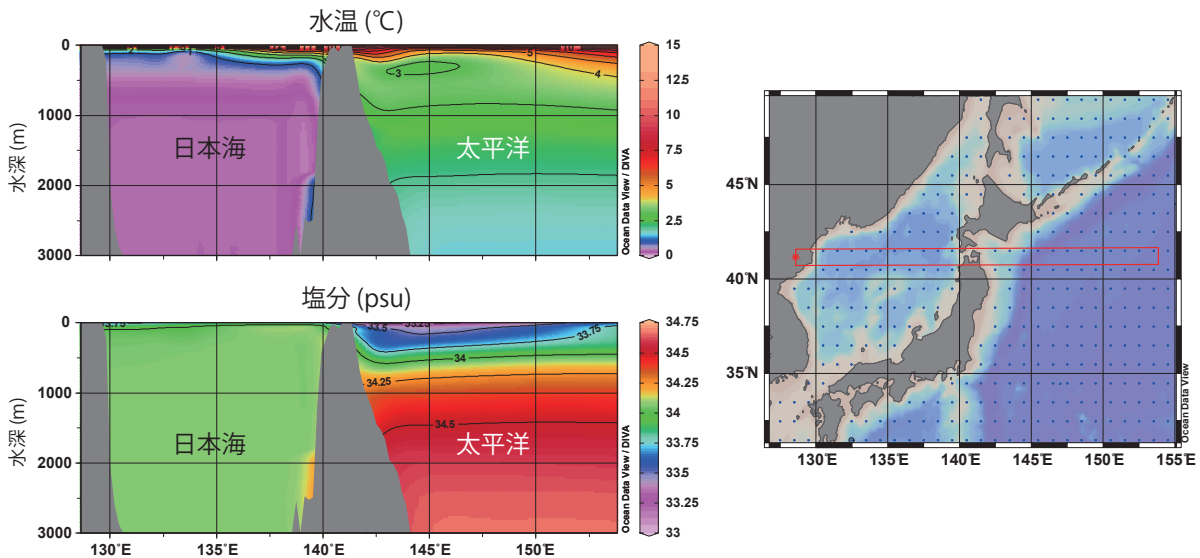


図 1. 日本海－太平洋の水温と塩分の断面図。外洋との深層水の交換がない半閉鎖的な日本海の水温・塩分は太平洋域の水温・塩分と異なった鉛直構造を示す。

います。本稿で取り上げるネオジウム (Nd) も海水に溶けている元素の一つで、主に大陸の岩石が水との反応で溶け (化学風化)、河川を通じて海洋に供給されている元素になります。海水中のネオジウム濃度は数十ピコモル (pmol)/kg 程度で、これは海水中の主要イオンの一つであるマグネシウム (Mg、約 50mmol/kg) と比べると、10 億分の 1 の濃度になります。このような海水中に微量にしか存在しない元素を、微量元素あるいは極微量元素と呼んでおり、ネオジウムもそのような微量元素の一つになります。

このような微量元素の同位体組成を分析するのは、非常に難しく、大量の海水試料の濃縮が必要であるにもかかわらず、1979 年には既に海水中のネオジウム同位体比の分布が報告されています。この結果は、ネオジウム同位体比の水塊化学トレーサーとしての有用性を明示した点で非常に重要な黎明期の研究結果の一つです。

なぜ、1970 年代から海水のネオジウム同位体比が注目され、分析され始めたかという点、当時既に深海底のマングノジュール¹⁾ のネオジウム同位体比 (海水組成を反映する) が分析されており、その結果から太平洋や大西洋で同位体比が異なること、ネオジウムの海洋での滞留時間が短いことなどから、ネオジウム同位体比が海水の混合や循環を解析できるトレーサーになるのではないかと、考えられ始めたためです。

ネオジウムは、質量数の異なる 7 つの同位体 (142, 143, 144, 145, 146, 148, 150) を持ち、多くの研究で議論に用いられるネオジウム同位体比は、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ の存在比になります。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の変動を議論する理由は、質量数 144 のネオジウム (^{144}Nd) は安定同位体であるのに対して、質量数 143 のネオジウム (^{143}Nd) は、質量数 147 のサマリウム (^{147}Sm) の放射壊変 (半減期 1.06×10^{11} 年) によって、生成される核種だからです。例えば、ある岩石中にサマリウムとネオジウムが含まれていた場合、時間が経過するにつれ、 ^{147}Sm の一部が ^{143}Nd へ放射壊変し、岩石中の ^{143}Nd 量が少し増

えます。そのため、マグマが固化してできた岩石の形成年代が古いほど、あるいは、岩石中にサマリウムが多量に含まれるほど、岩石は高い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を持つことになります。つまり、岩石の形成年代・種類 (Sm/Nd 比) に応じて、岩石のネオジウム同位体比が多様に変化します。また、岩石を形成するマグマ源自体の同位体比の変化 (時間と共に $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が増加) も合わせ、一般に年代の古い大陸地殻が広く分布する北米・グリーンランド域では、低い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を示す岩石が見られ、より形成年代の若い火山岩が広く分布する太平洋域では、より高い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を持つ岩石が分布しています。

陸域に露出する岩石のネオジウム同位体組成は、河川を通じて沿岸海水のネオジウム同位体比にも影響を及ぼします (図 2)。このような関係は海盆スケールでも見られ、北大西洋域の海水は $-12\varepsilon_{\text{Nd}}$ 程度 (エプシロンネオジウム値²⁾) で、北太平洋の海水は $-4\varepsilon_{\text{Nd}}$ 程度の値を示し、周辺陸域の岩石のネオジウム同位体比に概ね一致し、各海域・水塊ごとにネオジウム同位体比組成が大きく異なることがわかってきています。また、ネオジウム同位体比は、生物活動によって同位体比が変化することがないため、半保存性成分として振る舞うことも分かってきており、このような性質から「海水の由来」を解析できる化学トレーサーとされています。

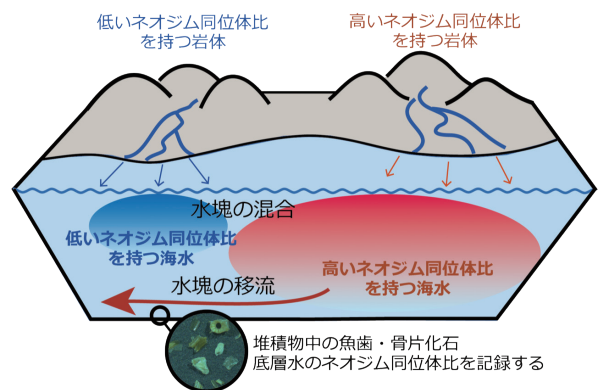


図 2. 海水のネオジウム同位体比の分布を決める要因の概念図



図3. 堆積物中に含まれる魚歯・骨片化石の写真。スケールはおよそ1 mm。

3. 魚の歯や骨の化石に記録される海水のネオジウム同位体比

陸から遠く離れた海洋底では、1000年間でおよそ1 cm程度の早さで堆積物が降り積もっていきます。このような堆積物について単2電池一個分程度の量を取って顕微鏡で覗くと、0.1～2 mm程度の魚の歯や骨片を十数個、場合によっては百個程度見つけることができます（図3）。0.1～2 mmの骨片数十個というのは、非常に少ない量ですが、魚の歯・骨はアパタイトで形成されており、海水中のネオジウムを濃縮しています。このような濃集する性質を持つことで、微量であっても歯や骨片化石のネオジウムの同位体比の分析ができます³⁾。最も重要な点は、このように分析される魚歯骨片化石のネオジウム同位体比が、当時の海底面付近の海水のネオジウム同位体比を記録している点です。このような特性を持つ魚歯骨片化石を各時代の海底堆積物から拾い集め、ネオジウム同位体比を分析することで、ネオジウム同位体比の変化から、当時海底面を流れていた「海水の由来」を知ることができます。

4. ネオジウム同位体比から明らかになった日本海の形成史

著者らは、2013年に統合国際深海掘削計画（Integrated Ocean Drilling Program (IODP) 346次航海）において、日本海中央部の大和堆で掘削された堆積物試料（過去1000万年間で堆積した全長約400 m）を対象として、魚歯・骨片化石のネオジウム同位体比を分析しました。ネオジウム

同位体比の分析から、試料を採取した日本海中央部の深層水が、いつ頃から北太平洋（ネオジウム同位体比高い）や南太平洋に由来（ネオジウム同位体比やや低い）する外洋の海水の影響を受けなくなったのかを調べようと思いました。

ネオジウム同位体比の結果から、日本海の深層水は、1000-850 万年前の間は、北太平洋に由来する海水（ネオジウム同位体比高い）の影響を受けており、850 万年-450 万年前については、南太平洋に由来する海水（ネオジウム同位体比やや低い）の影響を受けていたことが分かりました（図4）。さらに興味深いことに、450 万年前、約14 万年間の短期間に、日本海のネオジウム同位体比が大きく減少していたことも分かりました。これは、高いネオジウム同位体比をもつ太平洋の海水が、日本海に流入しにくくなったことを示しています。

450 万年前前後は、ちょうど太平洋プレートの運動が活発で、プレート縁辺にあたるニュージーランドやパプアニューギニアなどで造山運動が盛んだった時期に対応しており、東北日本でも造山運動が活発だった時期と重なります。そのため、今回得られたネオジウム同位体比データと併せて考えると、450 万年前頃に東北日本の隆起により、太平洋と日本海を繋いでいた海峡が14 万年程度の短期間に浅海化・縮小し、日本海と太平洋の海

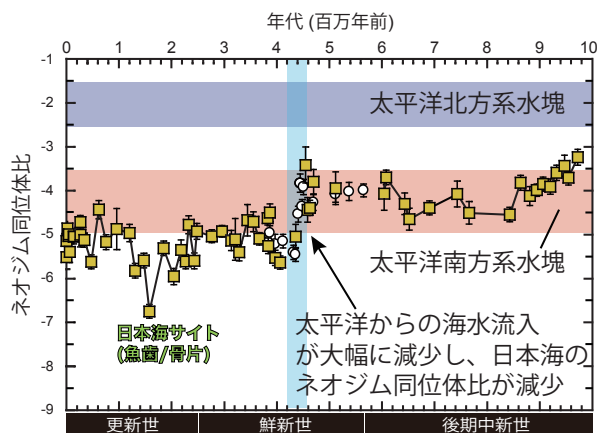


図4. 日本海堆積物中の魚歯・骨片化石のネオジウム同位体比の過去1000万年間の変動。同時期の太平洋北方系水塊と南方系水塊のネオジウム同位体比も合わせて示した。450 万年前に日本海のネオジウム同位体比の急激な減少が見られる。

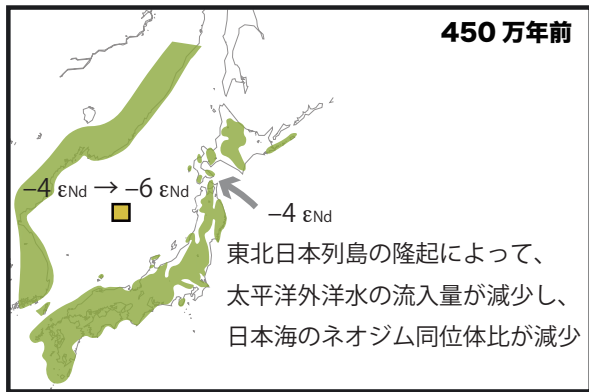


図 5. 450 万年前の日本海の推定される古地理図。東北日本の隆起に伴って、太平洋から日本海に流入する海水が大幅に減少したことが、日本海のネオジウム同位体比から示唆される。

水交換が大幅に減少したことが推測されます（図 5）。つまり、東北日本の隆起が障壁になって、日本海と太平洋間での深層水交換を減少させたことから、日本海と太平洋との分離はこの時期に起こったと言うことができます。

5. おわりに

日本海の形成史や日本列島の形成史は、多くの研究者が日本海海底にある大陸地殻の厚さと形、地磁気縞、断層の走向と分布、陸上岩石の古地磁気や日本海海底堆積物に残された微化石記録を丹念に調べることで復元されてきました。本研究は、これまで日本海では適用されていなかった「海水の由来」を探れるネオジウム同位体比を用いることで、日本海の閉鎖史をこれまでよりも高い時間解像度でかつ鮮明に描きました。

注

- 1) 堆積物中に形成されたマンガンやコバルト、鉄、ニッケルに富んだ球形の塊。

- 2) エプシロンネオジウム値

$$\epsilon_{\text{Nd}} = \left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}}_{\text{sample}} / 0.512638 - 1 \right) \times 10^4$$

- 3) アパタイトに濃集しているネオジウムは、およそ 100 μg/g 以上の濃度になる。したがって、骨片化石がおよそ 1 mg あれば、ネオジウム同位体比の分析ができます。海水のネオジウム同位体比の分析には、10 ~ 20 kg の海水が必要なことを考えると、アパタイト化石へのネオジウムの濃集の程度がよくわかると思います。

文献

Kozaka Y, Horikawa K, Asahara Y, Amakawa H, Okazaki Y (2018) Late Miocene–mid-Pliocene tectonically induced formation of the semi-closed Japan Sea, inferred from seawater Nd isotopes, *Geology*, 46(10), 903–906, <https://doi:10.1130/g45033.1>.

著者情報



堀川恵司（富山大学学術研究部理学系准教授）2006年、北海道大学大学院地球環境科学研究科博士後期課程修了。博士（地球環境科学）。日本学術振興会特別研究員（DC1）、高知大海洋コア総合研究センター、名古屋大学・フロリダ大学（日本学術振興会特別研究員PD）、富山大学大学院理工学研究部（理学）助教などを経て、2013年より現職。専門は、古海洋学、地球化学。

（2021年3月31日掲載）

