

## 球状コンクリーションの Sr 同位体比による地質年代決定とその意義



吉田 英一\*<sup>1</sup>  
Yoshida Hidekazu



浅原 良浩\*<sup>2</sup>  
Asahara Yoshihiro

### 1 はじめに：球状コンクリーション

球状コンクリーションとは、海底に堆積した地層（堆積岩）中から産出する非常に緻密で硬く、そして多くの場合、球状で主に炭酸カルシウム（鉱物は主に方解石（カルサイト））を主成分とする岩塊のことを指す（図1）。その丸い岩体は、世界中の堆積岩から産出する。これらは、時にはノジュールと呼ばれることもあるが、堆積学的には「コンクリーション」が専門用語として用いられている。

この球状コンクリーションは、中から保存良好な



図1 球状コンクリーション。ニュージーランドの約5,000万年前の地層から産出したもの。同じ地層から産出したコンクリーションの内部からは、クジラの頭の化石が発見された。このサイズのコンクリーションでも数年～数十年で形成されることが明らかとなった（参考文献2）。

化石を産出することから、特に古生物学の分野では1世紀以上も前より知られ、化石研究における重要な役割を担ってきた。しかし、コンクリーション形成のメカニズムについては、これまで不明のままであった。我々研究グループは、その形成メカニズムを明らかにすることを目的に、ツノガイコンクリーション（図2）をはじめ、様々なコンクリーションの調査・分析を行い、近年、以下のことを明らかにするに至った<sup>1,2)</sup>。

- 1) 球状コンクリーションの主成分となる炭酸カルシウムの炭素成分は、生物の有機炭素由来であること
- 2) 球状コンクリーションは、海底堆積物中に埋没した生物の腐敗に伴う有機酸の拡散と、海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応によって成長すること
- 3) 成長速度は非常に速く、メートルサイズのものでも数年～数十年で形成されること

これらの研究結果のうち、特に形成速度については、従来の推測、概念を覆す成果だと言える。このことは、次に述べる球状コンクリーションを用いた、ストロンチウム（Sr）同位体比による地質年代決定法の科学的拠り所ともなっている<sup>3)</sup>。

### 2 Sr 同位体層序学の応用

球状コンクリーションは、海水中のカルシウムイ

## ツノガイコンクリーション

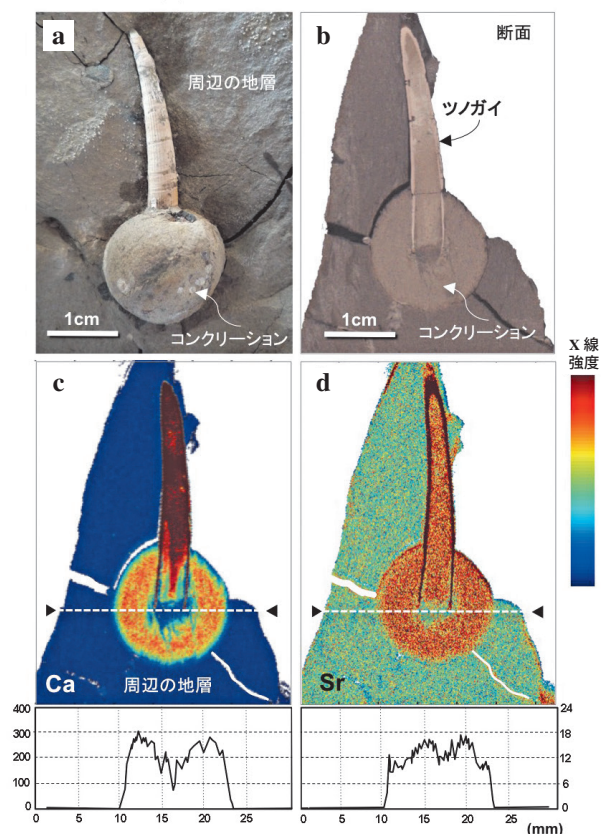


図2 Sr同位体層序年代決定に用いたツノガイコンクリーション (a, b 断面) とツノガイ中の元素分析 (c: Ca, d: Sr) 及び元素プロファイル (点線箇所)。参考文献3の図を一部改変。

オンを濃集・沈殿させ、急速に成長する。その際に、海水中の Sr も同様に濃集させることが分かってきた。その濃集量は、コンクリーション周辺の地層中の Sr 濃度の少なくとも2倍以上である (図2)。

海水から Ca が沈殿する際に、同じアルカリ土類金属元素の Sr が一緒に沈殿、濃集することは一般に知られた現象である<sup>4)</sup>。その Sr の濃集状態は、元素マップに示すように、コンクリーション中にほぼ均一である。このことは、コンクリーションが急速に炭酸カルシウムを沈殿させ、成長すると同時に海水中の Sr も同様に濃集していることを表している。このことは、当時の海水中の Sr の同位体比がそのまま記録されている可能性を示唆する。

地球の過去の海水中の Sr 同位体比については、海底に堆積してきた石灰岩等の Sr 同位体比 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) の分析結果から、カンブリア紀 (約5億5000万年前) 以降の海水中の詳細な Sr 同位体の変化が明らかとなっている<sup>5)</sup>。これは、過去に世界中の海底に堆積

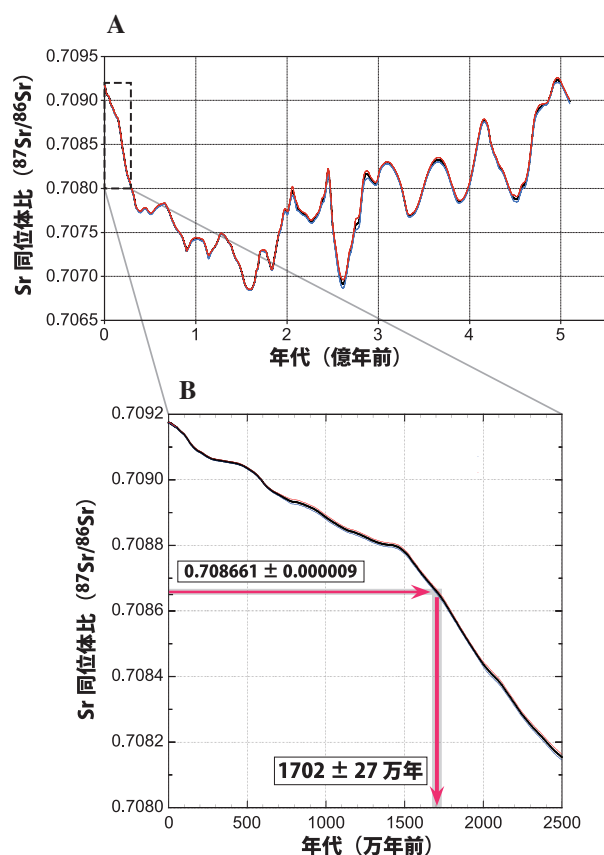


図3 カンブリア紀から現在までの Sr 同位体比曲線 (A) と約2,500万年前から現在までの部分の拡大 (B)。参考文献3の図を一部改変。

した炭酸カルシウムを主成分とする石灰岩や石灰質堆積物、化石等の Sr 同位体比の膨大な分析データを紡いだものであり、Sr 同位体層序 (学) とも呼ばれている<sup>6,7)</sup>。その Sr 同位体比の過去約5億年の変化を示した曲線が図3である。この曲線の、特に4000万年前以降の若い時代では、ほとんど直線的に Sr 同位体比が上昇していたことが分かっている。つまり、もし分析した試料の Sr 同位体比 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) が、この比較的若い時代の、特に約4000万年前より若い時代において、Sr 同位体比の直線的な変化の時代のどこかと一致したならば、その試料の堆積年代を高い精度 ( $\pm 10$  万年程度の年代誤差) で決定できることを示している。このことは、年代決定のできる化石が産出しない地層の年代を、球状コンクリーションの Sr 同位体比で決定できることを意味する。

表 1

| 試料名          | 成分                 | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ |     |          | 年代 (万年) *1      |
|--------------|--------------------|---------------------------------|-----|----------|-----------------|
| ツノガイコンクリーション |                    |                                 |     |          |                 |
| 111401       | calcite (カルサイト)    | 0.708651                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 111403       | calcite (カルサイト)    | 0.708648                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 111404       | calcite (カルサイト)    | 0.708657                        | +/- | 0.000014 |                 |
| 111405       | calcite (カルサイト)    | 0.708665                        | +/- | 0.000011 |                 |
| 111406       | calcite (カルサイト)    | 0.708671                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 111409       | calcite (カルサイト)    | 0.708651                        | +/- | 0.000014 |                 |
| 平均           |                    | 0.708657                        | +/- | 0.000009 | 1708 (+27, -28) |
| 無化石コンクリーション  |                    |                                 |     |          |                 |
| 0708-01      | calcite (カルサイト)    | 0.708657                        | +/- | 0.000011 |                 |
| 0708-02      | calcite (カルサイト)    | 0.708645                        | +/- | 0.000014 |                 |
| 0708-03      | calcite (カルサイト)    | 0.708682                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 0708-04      | calcite (カルサイト)    | 0.708676                        | +/- | 0.000011 |                 |
| 0708-05      | calcite (カルサイト)    | 0.708664                        | +/- | 0.000011 |                 |
| 平均           |                    | 0.708665                        | +/- | 0.000014 | 1695 (+36, -37) |
| コンクリーションの平均  |                    | 0.708661                        | +/- | 0.000009 | 1702 (+27, -27) |
| ツノガイ (殻部分)   |                    |                                 |     |          |                 |
| a1           | aragonite (アラゴナイト) | 0.708680                        | +/- | 0.000014 |                 |
| 1996-01      | aragonite (アラゴナイト) | 0.708654                        | +/- | 0.000014 |                 |
| 2014-01      | aragonite (アラゴナイト) | 0.708669                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 2015-01      | aragonite (アラゴナイト) | 0.708675                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 平均           |                    | 0.708670                        | +/- | 0.000012 | 1686 (+34, -34) |
| 周辺の地層        |                    |                                 |     |          |                 |
| 111407       | calcite (カルサイト)    | 0.709121                        | +/- | 0.000013 |                 |
| 111408       | calcite (カルサイト)    | 0.708626                        | +/- | 0.000014 |                 |
| 111410       | calcite (カルサイト)    | 0.708693                        | +/- | 0.000011 |                 |

(周辺の地層の Sr 同位体比は一定でないため年代決定ができない)

(周辺の地層の Sr 同位体比は一定でないため年代決定ができない)

\*1 参考文献 5) の Sr 同位体曲線に基づいて決定した年代.

### 3 球状コンクリーションの Sr 同位体比

炭酸カルシウムを主成分とする球状コンクリーションの Sr 同位体比を利用した年代測定の可能性を確認するために、既に地質時代の分かっている地層から産出する球状コンクリーション (ツノガイコンクリーション, 図 2) の Sr 同位体比の測定を行った。ツノガイコンクリーションを産出する地層は、富山県八尾町に分布し、同じ地層から産出する珪藻化石や貝化石の年代の他、K-Ar 法という岩石中の  $^{40}\text{K}$  の壊変に伴う  $^{40}\text{Ar}$  の量比による年代測定法等から 1,700 万年前~1,500 万年前の地層と報告されている<sup>8-10)</sup>。もし、この地層中から産出するコンクリーションから精度の高い Sr 同位体比が得られれば、

Sr 同位体比の年代曲線を用いることにより、化石年代 (相対年代法) や放射年代法から求められる年代よりも精度の高い年代を導き出すことができるかもしれない。

この考え方を検証するために、ツノガイコンクリーションの Sr 同位体比を集中的に分析し、Sr 同位体比の年代曲線から年代決定を行った。分析は、ツノガイコンクリーションの他、比較のためにツノガイの貝殻部分、周辺の地層部分も行った。ツノガイの貝殻部分は当時の海水起源の成分で形成されており、貝殻に含まれる Sr の同位体比は、ツノガイコンクリーションに含まれる Sr の同位体比と一致するはずである。一方、周辺の地層部分は、Sr を含んでいたとしても、その由来は堆積物中の鉱物等

であり、ツノガイコンクリーションやツノガイの貝殻部分とは異なった Sr 同位体比を示すはずである。Sr 同位体層序年代のコンクリーションへの適用性を確認するためには、これらの比較が不可欠である。

更に、同じ地層から産出する、化石（貝殻等）を含まない‘無化石コンクリーション’の分析も行った。炭酸カルシウムを主成分とする球状コンクリーションは、生物の腐敗とともに非常に早く形成される。つまり、これは、貝殻のような‘化石’を含んでも、含まない‘無化石コンクリーション’であっても、同じプロセスによって形成されると考えられる<sup>1,2)</sup>。したがって、今回、ツノガイコンクリーションを産出する地層中の、ツノガイコンクリーションと、いわゆる‘無化石コンクリーション’の Sr 同位体比が一致すれば、化石の有る無しに関わらず、コンクリーションのみの Sr 同位体比によって、堆積岩の堆積年代を精度よく推定できるようになる。

#### 4 Sr 同位体比の分析結果と意義

ツノガイコンクリーション、ツノガイの貝殻部分、周辺の地層部分そして‘無化石コンクリーション’の Sr 同位体比の分析結果を表 1 に示す。分析の結果、ツノガイコンクリーション、ツノガイの貝殻部分及び‘無化石コンクリーション’の Sr 同位体比が同じ値を示すことが分かった。そして、Sr 同位体の年代曲線とのマッチングによって、ツノガイコンクリーションと‘無化石コンクリーション’のすべての Sr 同位体比が示した地質年代は、 $1702 \pm 27$  万年という、これまでに報告された化石年代や K-Ar 年代よりも精度の高い年代値（ $\pm 10$  万年オーダーでの推定が可能）であることが示された<sup>3)</sup>。

このようにすべてのコンクリーションの Sr 同位体層序年代が一致したことは、炭酸カルシウムコンクリーションが、地層の堆積直後に形成されたことを示すと同時に、コンクリーションへの Sr 同位体

層序年代決定法の適用性を示す重要な結果であるとも言える。

複雑系で生じた自然現象に対して、そのプロセスを推測でき、ほぼ予想通りに分析結果と一致するということは非常に希なことである。このような、炭酸カルシウムの球状コンクリーションを単独で年代測定に活用したのは世界初の試みである。この方法によって、化石等を産出しない地層の年代の測定も可能と考えられる。これは、球状炭酸塩コンクリーションの応用・活用性として、今までにないアプローチと言えるだろう。もちろん、その適用性や手法としての汎用性については更に検討が必要だが、将来的には、堆積岩の形成年代推定の 1 つの有効な手段として活用されることが期待できる。

#### 参考文献

- 1) Yoshida, H., *et.al.*, *Scientific Reports* **5**:14123 | doi: 10.1038/srep14123 (2015)
- 2) Yoshida, H., *et.al.*, *Scientific Reports* **8**:6308 | doi: 10.1038/s41598-018-24205-5 (2018)
- 3) Yoshida, H., *et al.*, *Scientific Reports* **9**:1003 | doi: 10.1038/s41598-019-38593-9 (2019)
- 4) Holland, H. D., *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**, 1287-1301 (1964)
- 5) McArthur, J. M., *et al.*, *Journal of Geology*, **109**, 155-170 (2001)
- 6) McArthur, J., *et al.*, *Geologic Time Scale 2012*, Chapter 7, 127-144 (2012) doi: 10.1016/B978-0-44459425.00007-X.
- 7) Howarth, R. J., *et.al.*, *Journal of Geology*, **105**, 441-456 (1997)
- 8) Watanabe, M. & Yanagizawa, *The Island Arc*, **14**, 91-101 (2005)
- 9) Tamaki, M., *et.al.*, *Bull. Geol. Surv.*, **57**, 73-88 (2006)
- 10) Shibata, K. K-Ar ages of volcanic rocks from the Hokuriku Group. *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, **8**, 143-149 (1973)

(\*1 名古屋大学博物館,

\*2 名古屋大学大学院環境学研究科)