PR0006

球状コンクリーションの理解と応用
–自然に学ぶ長期シーリング新素材としての展開–

○吉田英一
（名古屋大学博物館）

地球表層での続成作用や化石化作用は、堆積サイクルにおける元素の移動・固定に伴う現象によるものである。また人間活動に伴う資源消費やコンクリートなどのインフラ整備も、これらの地球表層での物質循環・固定の一部と見ることができる。このような物質循環に伴う変化は、自然界ではおおよそ緩慢である。一方、人間活動に伴う材料・物質の循環は非常に速く、その速度的ギャップが二酸化炭素による温暖化や放射性廃棄物の蓄積などといった、これまでに直面してこなかった課題を顕在化させている。その課題に対処するための方法として進められているのが、地下貯留や地下処分（隔離）などの地下環境の活用である。その最大の理由は、少なくとも 10^3 年以上もの時間スケールでの保持・隔離が求められることにある。そのためには、物質循環の激しい地表に保管（管理）するのではなく、石油や鉱物鉱床が保持されてきた地下環境に委ねる方が技術的かつ倫理的にも現実的と考えられている（OECD/NEA, 2021）。しかし、地下に貯留したり埋設・隔離するためには、ボーリング孔や搬入立坑、トンネルが必須であり、貯留や埋設後に漏洩・汚染拡大させないためにもこれらの「穴」を長期かつ安定にシーリングすることが不可欠となる。

一方で、このような長期間のシーリングを可能とする技術（材料）を我々は有していない。例えば、工学的に用いられるセメントを基本とするグラウチング素材は、注入後のカルシウムイオンの放出等に伴い、そのシーリング（地下水の止水）性が損なわれる可能性があり、地層処分ではその効果は考慮されていない。この課題を解決するには、シーリング剤としての効果を有し、長期に渡って地下環境においても安定に存在し続ける素材（鉱物）を用いるしかない。その背景のもと、着目したのがコンクリーションである。

コンクリーションには、主に Ca, Si, Fe をセメントの主成分とするものがある。Si をセメントとするコンクリーションは、フリントストーンや珪化木などで知られる（Yoshida et al., 2021）。また Fe を主成分とするコンクリーションは、近年火星地表堆積物中でも発見され、火星表層での「水」の存在とその当時の環境を探るアナログ材料として注目されている（Yoshida et al., 2018a）。そして Ca（とくに $CaCO_3$）を主成分とするコンクリーションは、保存良好な化石を内包するなど最もよく知られた地質素材であり、メートルサイズでも数年程度で形成されることが明らかとなっている（Yoshida et al., 2015, 2018b, 2020）。その形成・成長は、海底堆積物中の生物遺骸から拡散・放出される有機酸起源の炭酸と海水中のカルシウムイオンとの過飽和・沈殿反応に伴う、カルサイトの急速沈殿・空隙シーリングによる。その結果、数百万年以上もの長期に渡って生物殻が風化・変質することなく産出することとなる（吉田, 2023）（右写真参照）。

オオエンコウガニ科（中新世：約15Ma）Loc.ウルグアイ（Rio la Plata）
全身部位が残っていることは死後スカベンジャーに捕食される前にコンクリーション化したことを示す（名大博物館蔵）。

そしてこの特性を応用し、民間化学工業会社と

人工的コンクリーション化剤‘コンクリーションシード(略称コンシード：特許第6889508号;特許7164119号;特許7215762号)’を開発した。その利点・特徴は、

1)従来のセメントミルク等の物理的圧入法と異なり、元素の拡散・沈殿によりミクロンオーダー以下の微細な岩盤中亀裂・空隙もシーリングが可能

2)元素拡散でシーリングするため、地下水の(高)間隙水圧の影響を受けない

3)地下水中の HCO_3^-や Ca^{2+}、コンクリートからの Ca^{2+}も活用でき、持続的かつ長期的なシーリングが可能、という点である.

このコンシードを用いた地下環境でのシーリング実証試験を、日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター（北海道幌延町）で行っている。試験は、地下350 mの地下坑道掘削に伴う岩盤の破壊領域（掘削損傷領域：EDZ)部分の水みち亀裂のシーリングを目的に、坑道壁面や底盤からEDZを含む深さ1〜2 mのボーリングを複数本掘削し、コンクリーション化剤を注入し、透水性の変化をモニターするというものである。その最新の結果、EDZ（掘削影響領域）の透水係数が、半年で2オーダー以上低下し、周辺母岩とほぼ同レベルの透水性に改善された。またオーバーコアリングの観察によって、亀裂がコンクリーション化による炭酸カルシウムでシーリングされていることを確認している。さらに、本試験中にM5.4の直下型地震が発生し、透水性が一旦擾乱され透水性が上昇したにも関わらず、数ヶ月後には元の低透水性にリカバリーした。これは、コンクリーション化剤の長期的シーリング効果を保証する現象と言える。このようなシーリング効果は、地層処分だけでなく、岩盤中の割れ目帯や断層破砕帯などの大規模水みちの止水対策や，既存トンネルの修復に用いられるグラウト技術の代替策として、さらにはCCSや石油廃孔の長期シーリングなどへも適用可能である。

炭酸カルシウム(カルサイト)は、自然界に豊富に存在し、生成が速くかつ鉱物的にも安定である。生物化石を含むコンクリーションの存在は、そのことを明確に語っている。このような自然現象を理解し、応用へと展開させるには、地球化学的アプローチが重要かつ不可欠である。と同時に、地質学・鉱物学・古生物学・地球物理学並びに関連する工学分野との協働が、直面している環境問題の解決に向けてさらに重要となるだろう。

コンクリーション研究の展開は、名古屋大学山本鋼志特任教授、淺原良浩准教授、南雅代教授、東京大学丸山一平教授ほか、積水化学（株）、日本原子力研究開発機構など多くの同僚・研究機関との協働によるものである。ここに記して謝意を表する。本研究は、科研23H00280、経産省資源エネルギー庁委託事業（JPJ007597）及び中部電力特定テーマ公募研究助成研究による成果を含む。

文献 Yoshida et al. (2015) *Scientific Reports* doi:10.1038/srep14123; Yoshida et al. (2018a) *Science Advances* doi:10.1126/ sciadv. aau 087; Yoshida et al. (2018b) *Scientific Reports* doi.10.1038/ s41598-018-24205-5.2; Yoshida et al. (2020) *Geochemical Journal.* 10.2343/geochemj.2.0593; Yoshida et al. (2021) *Scientific Reports* doi:10.1038/ s41598-021-83651-w. OECD/NEA (2021) *OECD publishing Paris*, NEA/RWM/R1. 吉田英一 (2023) *地質学雑誌* doi:10.5575/ geosoc.2022.0022.

Understanding and application of spherical concretions: A new sealing material learnt from nature

*H. Yoshida (Nagoya University Museum)