

地球上のケイ素の循環と生物の関わり

池田 丈

ケイ素（シリコン，Si）は酸素に次いで地殻上に二番目に多く存在する元素であり，主に鉱物の主成分として存在している。珪藻や放散虫，一部の海綿や一部の植物などはケイ素を積極的に取り込み，二酸化ケイ素（シリカ， SiO_2 ）の形で骨格や殻などとして利用するものの，多くの生物にとっては馴染みの薄い元素だと言える。

一方で，地球上におけるケイ素の循環は，生物の根幹となる炭素の循環と密接に関連している。なぜなら，シリカ被殻を有する珪藻は海洋における主要な一次生産者であり，地球上の炭酸固定の約20%を担っていると言われている。珪藻の生育には，被殻の材料となる可溶性のケイ酸（ $\text{Si}[\text{OH}]_4$ ）が必須であり，元素比で炭素のおよそ1/7にも相当する大量のケイ素が取り込まれる。

ケイ酸は主に鉱物（鉱物態シリカ）の風化作用によって生じ，それが河川を通じて海洋に流れ込むことで供給される¹⁾。ケイ酸は珪藻に取り込まれ，生物態シリカへと変換される。シリカ被殻の比重は大きいので，珪藻やその遺骸は徐々に深層へと沈降する。また，珪藻が動物プランクトンなどに捕食されて生じる糞粒としても生物態シリカは有機物とともに沈降する。生物態シリカは非晶質であるため比較的溶解しやすく，大半は沈降の過程で再度溶解して可溶性のケイ酸に戻るが，一部は海底へと到達する。この過程で，有機物も一緒に海洋深層に沈降するため，シリカの沈降は炭素を海洋表層（有光層）から海洋深層へと引き込む「生物ポンプ」として機能している。沈降して堆積したシリカは，長い時間をかけて鉱物態シリカへと変化する。

このようにケイ素は地球上を循環しているが，最近では人間活動の影響がこのケイ素の循環（ひいては炭素の循環）にも及んでいることが危惧されている¹⁾。ダムの建設などにより陸域に停滞水域が形成されると，そこで淡水珪藻によるケイ酸の消費や，（可溶化してケイ酸になりうる）シリカ含有微粒子の沈降が生じ，下流へのケイ酸供給量が低下する。海洋に流れ込むケイ酸量が減少すると，珪藻の生育が制限されるため，本来であれば珪藻に消費される窒素やリンなどの栄養分が別の生物に取り込まれることになり，珪藻以外の植物プランクトンである渦鞭毛藻などの優占化へとつながる。これは有害赤潮の増加の原因とも言われている。また，優占する一次生産者が交代することで，食物連鎖にも変化が起こり，近年のクラゲの大発生にもつながっている可能性が指摘されている²⁾。このように，ケイ素の循環は環境や生態系にも大きな影響を与えていることが明らかになりつつ

ある。

これまで，シリカを蓄積するとして知られていた生物は上にあげた通り真核生物ばかりであったが，最近では土壌細菌³⁾やシアノバクテリア^{4,5)}など原核生物によるシリカ蓄積も新たに発見されており，シリカ循環に関わる生物は従来考えられていたよりも多様であることが示唆されている。早くから研究されていた真核生物では，シリカ蓄積のメカニズムや関与するタンパク質の存在が明らかになっているが，原核生物によるシリカ蓄積のメカニズムはまだ謎に包まれている。

しかし最近，その手がかりとなりうる事例が報告された。Kenlaらは，植物の根より単離された*Streptomyces*属細菌の代謝産物解析の過程で，通常鉄の取込みに関わるシデロフォアが，FeではなくSiと錯体を形成していることを発見した⁶⁾。シデロフォアは微生物が鉄欠乏時に産生する天然の鉄輸送キレート剤であり，三価の鉄に対して高い親和性を示す低分子有機化合物である。シデロフォアを分泌することにより周囲の不溶性の鉄分を可溶化して取り込むことで，自己の増殖に必要な鉄を確保することが知られている。しかし，本菌の培養液より単離されたカテコール型シデロフォアであるエンテロバチン（別名エンテロケリン）は，通常Feに配位する3つのカテコール部位がSiに対して安定に配位していることが確認された。この報告以前にも，*in vitro*でシデロフォアとSiの錯体を人工的に形成させた例はあったが⁷⁾，本報告は天然で見つかった初めてのケースであり，シデロフォアが鉄だけでなくケイ素の輸送にも関わっている可能性を示唆するものであった。同様の構造を有するシデロフォアはさまざまな微生物が産生するため，シデロフォアによるケイ素の可溶化や取込みは自然界に広く分布している可能性もある。ケイ素と生物の関わりは，予想以上に深いのかかもしれない。

- 1) Tréguer, P. J. and De La Rocha, C. L.: *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **5**, 477 (2013).
- 2) Richardson, A. J. et al.: *Trends Ecol. Evol.*, **24**, 312 (2009).
- 3) Hirota, R. et al.: *J. Bacteriol.*, **192**, 111 (2010).
- 4) Baines, S. B. et al.: *Nat. Geosci.*, **5**, 886 (2012).
- 5) Tang, T. et al.: *Nat. Commun.*, **5**, 4143 (2014).
- 6) Kenla, T. J. N. et al.: *Chem. Commun.*, **49**, 7641 (2013).
- 7) Schmiederer, T. et al.: *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 4230 (2011).