

## 生物によるシリカの形態制御

池田 文

ケイ素（シリコン，Si）は酸素に次いで地殻上に最も多く存在する元素である。元素周期表では炭素の下に位置し、炭素と同様に原子価が四であることから、SFの世界では炭素の代わりにケイ素を主要な構成元素とする生物などがしばしば登場する。実際にはSi-Si結合は炭素間のような二重結合や三重結合を形成できないため炭素の代替とはなりえず、ケイ素ベースの生物が（少なくとも地球上には）存在するとは考えにくい。ケイ素を多量に含有する生物は現実には存在するが、その場合ケイ素は二酸化ケイ素（シリカ，SiO<sub>2</sub>）の形で、ガラス質の骨格や殻などとして利用されている。シリカを含む代表的な生物としてシリカの殻を持つ珪藻やシリカ骨格を有する一部の海綿が挙げられる。また身近なところでは、イネやトクサといった植物がシリカを蓄積し、物理的強度や病気への抵抗性を高めていることが知られている。

特に珪藻の有するシリカ被殻は、表面に微細孔などが精密に配列しており、美しい幾何学的パターンを形成している。生物による無機鉱物合成（バイオミネラリゼーション）が厳密に制御されていることを示す代表例である。被殻の形状は種によってさまざまであり、遺伝的に制御されている。このような生物由来の合成能力を利用して、従来の化学プロセスでは作りえない新たな構造体を創出しようという研究が盛んに行われている。特にケイ素は半導体・太陽電池の原料として産業的に重要な素材であり、ナノスケールでの微細加工技術が確立されている。人工的なナノ構造体作製法と、ナノサイズの生体分子による自己組織化的なバイオプロセスを組み合わせることで、革新的な機能性ナノ構造体の創出が可能になるものと期待されている。

生物によるシリカ形成は、環境中のケイ酸が生体内に取り込まれ、濃縮されたケイ酸が重合することによって生じる。シリカ形成に関与するタンパク質として、珪藻では1999年に発見されたシラフィン（silaffin）<sup>1)</sup>がよく知られている。しかし、*in vitro*でケイ酸溶液にシラフィンを添加しただけでは単に球状のシリカ粒子が形成されるだけであり、複雑な形状のシリカ合成が生体内でどのように制御されているかについては不明な点が多い。

最近、Krögerらのグループは、海洋性珪藻 *Thalassiosira pseudonana* のゲノム上に、シラフィン様領域を含む機能未知のORF（cingulinと命名）が6種類存在することをバイオインフォマティクス解析により発見した<sup>2)</sup>。珪藻のシリカ被殻は、シャレーのように口徑の微妙に異なる円筒形の殻が2枚合わさった構造をして

いる。これら6種のcingulinはシャレーの側面部に相当する位置に局在していることが、発現したGFP融合cingulinの蛍光観察により判明した。しかし、発現したGFP融合cingulinは、SDS存在下での熱処理やフッ酸処理によるシリカ除去を行っても溶液中に抽出されず、不溶性の複合体を形成していると考えられている。一方、フッ酸処理によるシリカ除去後には環状のリボンのような有機マトリックスが残存することから、cingulinはこの一部として含まれていると考えられている。このリボン様マトリックスの形状はシリカ被殻側壁部パターンに類似しており、これにケイ酸溶液を添加するとリボン内のフィラメントに沿ってシリカの重合が観察された。したがって、このcingulinを含む不溶性の有機マトリックス（タンパク質複合体）がテンプレートとなってフィラメント状のシリカが形成され、その周囲に可溶性のシラフィンなどが自己組織化して更なるシリカ形成を行うことで、被殻となるシリカパターンが形成されることが予想されている<sup>2)</sup>。

同様に、海綿においても不溶性のタンパク質フィラメントを軸として周囲にシリカが重合し、針状シリカが形成されることが知られている<sup>3)</sup>。また最近、Hirotaらは土壌より単離された一部の *Bacillus* 属細菌が孢子殻上にシリカを蓄積することを発見した<sup>4)</sup>。孢子殻もやはり多くのタンパク質からなる不溶性の膜である。複雑な形状のシリカ合成のために、生物がタンパク質複合体をテンプレートとして利用していることが窺える。

不溶性の複合体を形成しているタンパク質はSDS処理などで可溶化できないものもあり、上記のcingulinのように従来の生化学的アプローチでは発見が困難なものも多いと予想される。ポストゲノム時代を迎え、オミクス的アプローチによる解析<sup>5,6)</sup>も進んでおり、今後シリカ形態制御機構の更なる解明と、それを基にしたバイオナノテクノロジーの発展が期待される。

- 1) Kröger, N. *et al.*: *Science*, **286**, 1129 (1999).
- 2) Scheffel, A. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 3175 (2011).
- 3) Shimizu, K. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **95**, 6234 (1998).
- 4) Hirota, R. *et al.*: *J. Bacteriol.*, **192**, 111 (2010).
- 5) Mock, T. *et al.*: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **105**, 1579 (2008).
- 6) Sapriel, G. *et al.*: *PLoS One*, **4**, e7458 (2009).