

ケ イ 素 の 生 物 学 — 4 —

京都大学名誉教授

高 橋 英 一

動物とケイ素

動物の骨格成分としての役割

動物の種類による骨格成分の特徴

動物は体を保護あるいは支持する役目をもった堅固な構造, すなわち骨格を備えています, これには体の外側を覆う外骨格と, 体内にある内骨格の二つがあります。

たとえば, 刺胞動物(腔腸動物)のサンゴ虫の分泌する珊瑚, 軟体動物の貝類の貝殻, 節足動物のエビ, カニ, 昆虫類の甲皮, 脊椎動物の魚類や爬虫類の鱗などは外骨格に属します。また内骨格としては, 脊椎動物の背骨のほか, きょく(棘)皮動物のウニの殻や海綿動物の骨片, 原生動物の有孔虫や放散虫の殻なども内骨格に入れられています。

これらの骨格をつくっている主成分は, 大きく有機質と無機質に分かれます。有機質にはキチンと硬タンパク質があります。節足動物の甲皮はキチンでできています。硬タンパク質でできているのは, 軟骨魚類の骨(コラーゲン), 魚鱗(イクチルエピジン), ゆあみ(沐浴)海綿の海綿繊維(スポンジン)などです。

無機質にはシリカ, 炭酸カルシウム, リン酸カルシウムの三種類があり, そのいずれを選ぶかは動物の系統によってきまりがあります。なお無機質の骨格は有機質の組織の上につくられるもので, その典型的な例は軟骨組織(コラーゲン, 糖タンパクからなる)へのリン酸カルシウムの沈積によって起こる硬骨化(骨化)にみられます。

ケイ素を骨格成分にしている動物の系統

表2はいくつかの動物の硬組織(被殻, 骨)のケイ素とカルシウムの含有率です。これをみるとケイ素含有率が著しく高いものはカルシウム含有率は著しく低い(またはその逆)こと, すなわちケイ素(シリカ)型とカルシウム(炭酸カルシウ

表2 動物の硬組織(被殻, 骨)の主要構成元素 (BOWEN 1979)²⁵⁾

	Si (ppm)	Ca (ppm)
原生動物		
SiO ₂ 型	410,000	17,000
CaCO ₃ 型	12,000	355,000
海綿動物		
SiO ₂ 型	437,000	17,000
CaCO ₃ 型	..	340,000
腔腸動物		
CaCO ₃ 型	1,000	350,000
棘皮動物		
CaCO ₃ 型	4,000	350,000
軟体動物		
CaCO ₃ 型	800	395,000
哺乳動物		
Apatite型*	100	170,000

*Ca₃(PO₄)₂・CaF₂でP 70,000ppm, F 2,000ppmを含む。..記載なし

ムあるいはリン酸カルシウム)型の二つがあることが分かります。そしてこれらを動物の系統樹のうえにたどってみると, 図5のようになります。

まず原生動物ですが, これは体制のもっとも単純な単細胞動物で, 運動は偽足あるいは鞭毛, 繊毛で行います。体の保護のためには, 体表にある特別の皮膜から角質, 石灰質あるいはケイ酸質の物質を分泌して被殻を形成しています。原生動物にはいくつかのグループがありますが, その中で放散虫はもっぱらケイ酸質を分泌し, シリカ型の被殻をつくります(図6)。これに対して有殻アメーバや有孔虫には, ケイ酸質を分泌するタイプと, 炭酸カルシウムを分泌するタイプの二種類があります(図7, 8)。

海綿動物は後生動物の中で分化の程度が最も低く、動物なのに固着性です。そして少数のものを除いて無機質の骨片を持っています。すなわち体の外面の一層の皮層と、内腔(胃腔)に面した一層の胃層の両細胞層の間に寒天様のものがつまっており、その中に骨片母細胞から分泌されたケイ酸質あるいは炭酸カルシウム質の骨片があります。そしてその骨片がばらばらに散在するもの、堅く規則正しく組合わさったもの、有機質の海綿質繊維の網目によって独特の骨格を形成するものなどがあります。

これらの中、炭酸カルシウムの骨片を持つものは石灰質海綿、ケイ酸質の骨片を持つものはそれがガラスに似ているところからガラス海綿と呼ばれています(図9)。また不規則な網目状をしている海綿質だけでできているものは弾力性に富んでおり、浴用に使われるのでゆあみ(沐浴)海綿と呼ばれています。

腔腸動物(刺胞動物)には、体の一端で他のものに固着するポリプ型と水面に浮かぶクラゲ型があります。ポリプ型に属するサンゴ虫は、炭酸カルシウムを分泌して珊瑚をつくるので有名です。これに対して浮遊するクラゲは骨格を持たず、裸のままです。

環形動物は体表はクチクラで覆われ、さらにキチン質の剛毛を持つもの(ゴカイ、ミミズ)と持たないもの(ヒル)とがあります。ミミズなどには石灰腺があり、カルシウムを分泌して

図5 動物の硬組織構成元素の種特異性

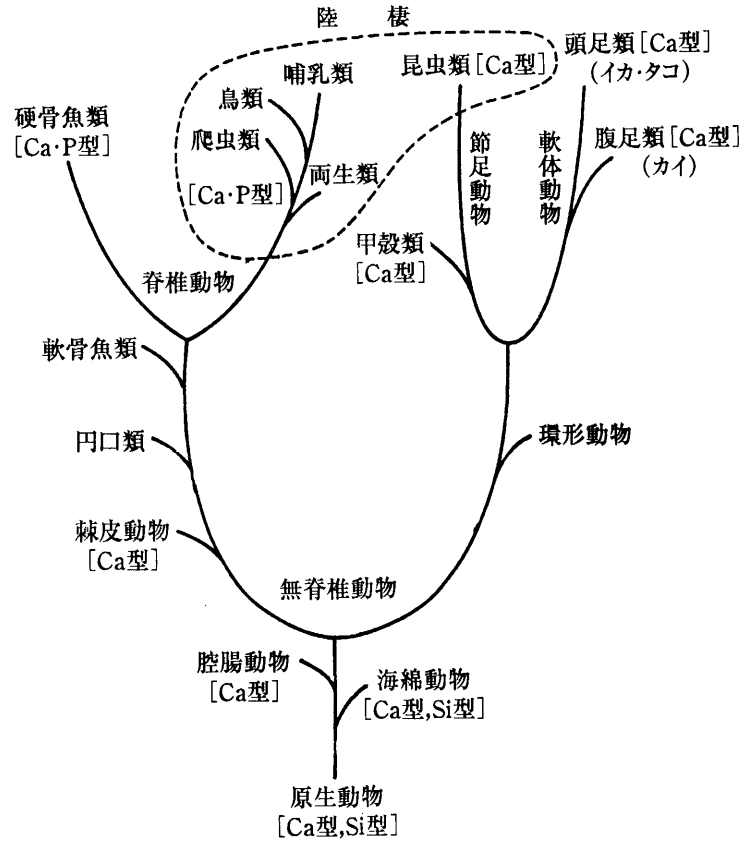
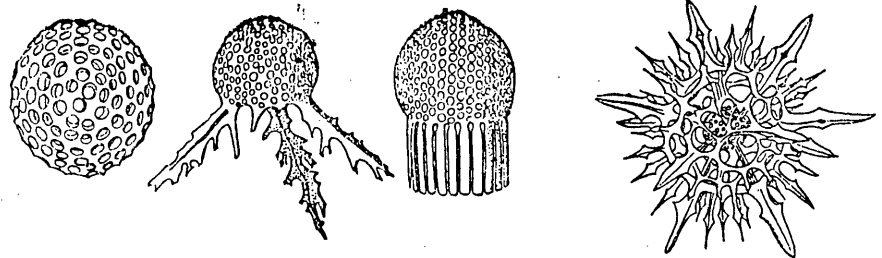
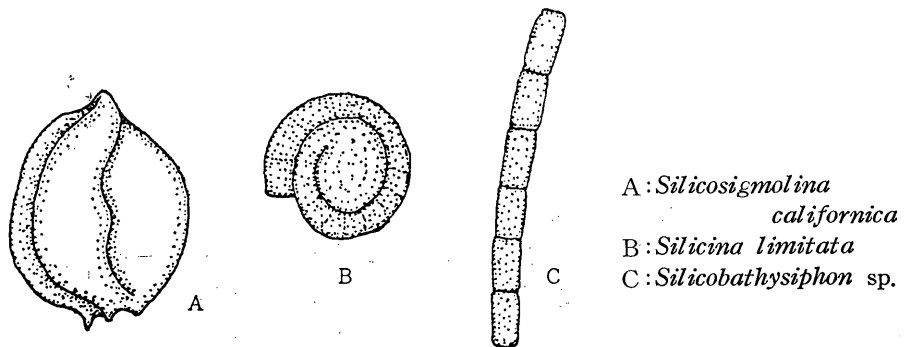


図6 放散虫のケイ酸殻のいろいろ²⁶⁾



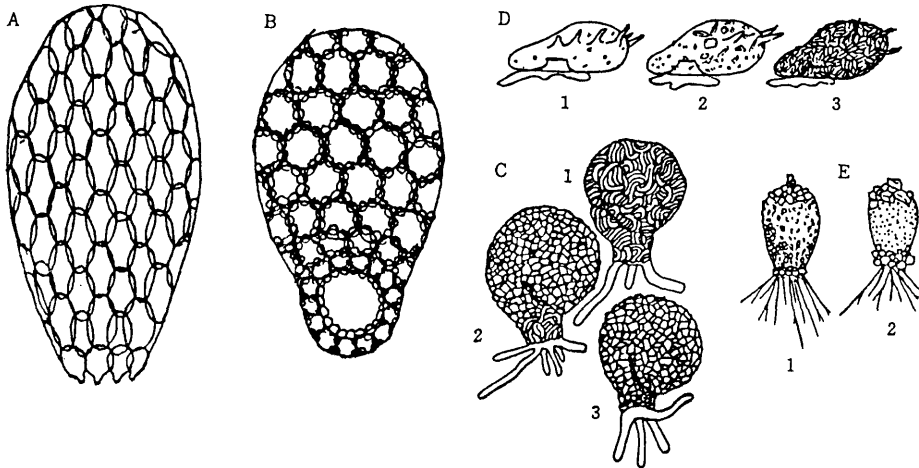
1874年から1876年にかけてイギリスの探検船チャレンジャー号が大洋の底から採集した試料についてエルンスト・ヘッケルがしらべたもの。

図7 ケイ酸質有孔虫のいろいろ²⁷⁾



- A: *Silicosigmolina californica*
- B: *Silicina limitata*
- C: *Silicobathysiphon* sp.

図8 ケイ酸質有殻アメーバの種々のタイプ²⁷⁾



吸収したケイ酸を分泌して種特有の被殻をつくっているもの

A: *Euglypha rotunda* B: *Trinema lineare*

砂粒やケイ藻の破片などのケイ酸質粒子を体の外側へ附着させて被殻をつくるもの

C: *Lesquereusia* sp. 1) 分泌ケイ酸により固有の被殻を形成しているもの

2) ケイ酸質砂粒を附着(頸部はのぞく)

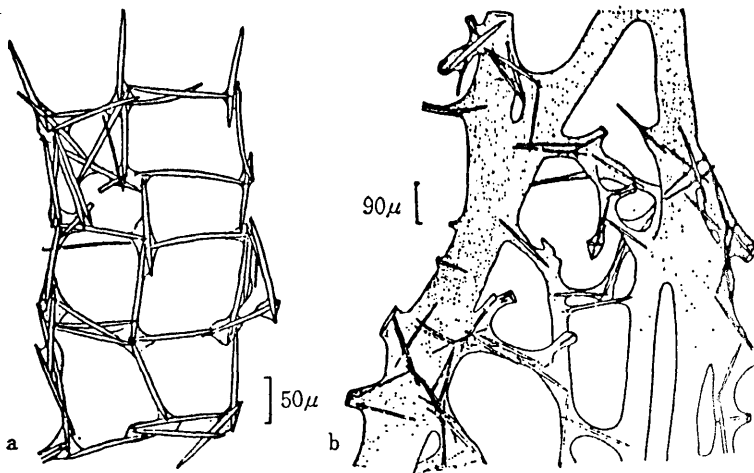
3) 体表面全部が砂粒でおおわれているもの

D: *Centropyxis aculeata* 1) わずかの粒子 2) かなり多くの粒子を附着

3) ケイ藻の破片でおおわれているもの

E: *Pseudodiffugia gracilis* 1), 2) ケイ酸質粒子のつき方のちが

図9 ガラス海綿 (*Halicona oculata*) のケイ酸質骨格 (HARTMAN 1958 による)²⁸⁾



a: ケイ酸質骨片が海綿質の小塊によって結合されている。

b: ケイ酸質骨片は厚い海綿質センイの中に埋没している。

炭酸カルシウムの形で排泄することが知られています。

節足動物も体表はキチンタンパク質からなる硬いクチクラで覆われていますが、甲殻類(エビ、カニ)ではクチクラにカルシウムが沈着して、厚い堅固な甲皮となっています。またフジツボは表皮が分泌した石灰質の殻を持っています。

軟体動物は筋肉の非常に発達した体をしており、貝類では外套膜から分泌された石灰質の貝殻で柔らかい体を保護しています。これに対してイカ、タコの類では甲またはペンとして内在しており、中には欠如しているものもありますが、貝類より著しく速い運動能力で身を守っています。

きよく(棘)皮動物は、ナマコでは体壁中に顕微鏡的な石灰質の骨片が散在するにすぎませんが、ウニ、ヒトデは体表面に石灰質の刺を持ち、体壁中にも石灰質の骨格または骨片があります。

脊椎動物は内骨格がよく発達しています。円口類(メクラウナギなど)、軟骨魚類(サメ、エイなど)の骨格は硬タンパク質からなる軟骨質ですが、それ以上ではこれにリン酸カルシウムが沈積して硬骨質になります。

このように何を硬組織の主成分にしているかは動物の系統と関係があり、進化に伴う漸移がみられます。すなわち原生動物、海綿動物ではケイ素型のものと同型のものがありますが、腔腸動物以上ではケイ素型ものは姿を消し、硬骨魚類以上ではリン酸カルシウム(アパタイト)型になっています。

動物は進化の過程でケイ素よりカルシウムの方を骨格成分に選ぶようになったようですが、それは何故でしょうか。一つにはカルシウムの方が溶解度の調節が容易なことが考えられます。またカルシウムには細胞内外の情報伝達、細胞間接着、筋肉収縮などに重要な役割があり、そのため動物はカルシウムの吸収、代謝、貯蔵などの機構や組

織を発達させていったことも関係していると思われます。

硬組織形成における有機質のマトリックス（基礎となる組織）の合成，ケイ質化，石灰化の三つの過程は生物進化と関係がありますが，さらに興味深いのは，同じ動物の一生の間に，この三つの過程が次々に起こる現象が見いだされていることです²⁸⁾。

すなわち硬骨海綿とよばれる海綿は，はじめケイ酸質の骨片ができ，ついでそれらは部分的に有機質のマトリックスに包まれ，最後に石灰質の骨格の中に埋まります。これは硬組織形成におけるケイ質化と石灰化が，進化の過程で連関して起っていることを示しています。

ケイ酸骨格の作り方

原生動物の放散虫やガラス海綿は，溶解している濃度のうすいケイ酸を吸収濃縮してシリカゲルにし，骨格を作っているわけですが，その仕組みはまだよく研究されていません。

ガラス海綿では軸糸とよばれる線状構造のまわりにシリカの層が形成され，その外側を有機質の軸鞘が囲み，そしてこれらが海綿体内に規則正し

く配列して骨格となるといわれています。またガラス海綿をケイ酸を含まない培地で育てると，海綿特有の多孔質の立体構造ができず，平らな細胞の集塊となり，さらにばらばらの小さな塊になってしまうことが観察されています²⁸⁾。

ケイ酸の体内集積には，細胞間のケイ酸の輸送機構，呼吸エネルギーを使ってケイ酸を取り込む特殊な膜（シリカレンマ）の働きが関係していることが，あとで述べるようにケイ藻で明らかにされていますが，同様な仕組みがこれらの動物にもあるのかもしれませんが。

参考文献

- 25) H. J. M. Bowen : *Environmental Chemistry of the Elements*, pp. 99-100, Academic Press(1979)
- 26) ドフランドル著，菅原健，田中元治訳：生物から岩石ができる話，白水社クセジュ文庫（1953）
- 27) E. C. Bovee : *Distribution and Forms of Siliceous Structures Among Protozoa*, 文献 6) の pp. 233-279
- 28) W. D. Hartman : *Form and Distribution of Silica in Sponges*, 文献 6) の pp. 453-493