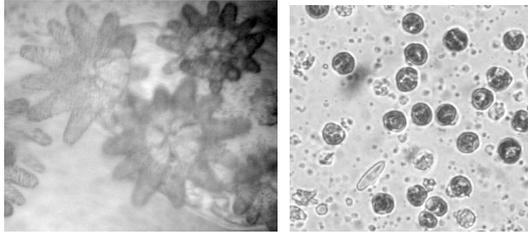


共生の科学

地球生命誌を重ね綴った構造体：  
縞状鉄鉱床・ストロマトライト・サンゴ礁

後編



サイエンス・プロデューサー 川口伸明

写真：【人工孵化したポリプ(左)と褐虫藻(右)】

■サンゴ礁：海中の熱帯雨林

443号掲載の本稿前編において、原始海洋の深海底で最初の生命が誕生してほどなく、光合成生物が現れ、やがてシアノバクテリアによる酸素発生の光合成が始まることで、地球環境は劇的に変わってきたということを述べてきた。オゾン層の形成により、生物の活動範囲が広がり、環境に応じて生物の形態や機能の多様化・複雑化が起こった。そして、現在の地球環境の中で、生物の種多様性が最も高い場所が、陸上では熱帯雨林 (rain forest)、海中ではサンゴ礁 (coral reef) だと言われている。

サンゴはクラゲやイソギンチャクと同じ刺胞動物門の生物で、ポリプ (polyp) と呼ばれる小さなイソギンチャク形をした単位構造が無性的に分裂し群体を成したものである (写真 1、図 1)。堅い石灰質 (炭酸カルシウム) の骨格を持ち、サンゴ礁を形成するキクメイシやミドリイシ、コモンサンゴなどの造礁性サンゴと、礁を形成しないイソバナやウミヤギ、ウミキノコなど軟体サンゴに分かれる。ここで、サンゴ礁とは、造礁性サンゴだけでなく、石灰藻、有孔虫、貝類など石灰質骨格を形成する様々な造礁性生物が一体となって作り上げる生態系であり、またその地形を指す。

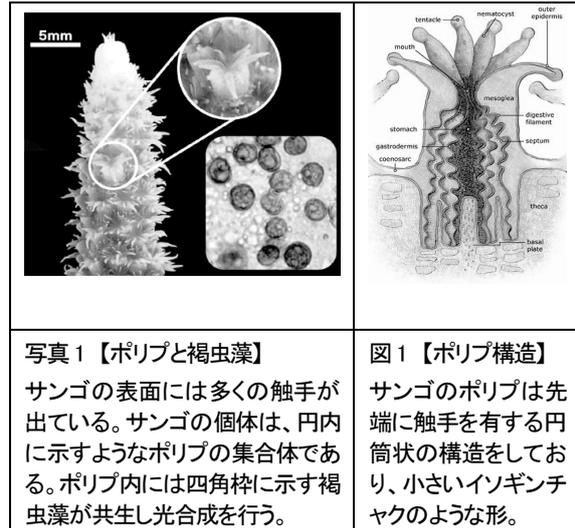


写真1【ポリプと褐虫藻】

サンゴの表面には多くの触手が  
出ている。サンゴの個体は、円内  
に示すようなポリプの集合体であ  
る。ポリプ内には四角枠に示す褐  
虫藻が共生し光合成を行う。

図1【ポリプ構造】

サンゴのポリプは先端に触手を有する円筒状の構造をしており、小さいイソギンチャクのような形。

造礁性サンゴには様々な色や形態が知られており、それに応じて多くの分類がなされている (写真 2) が、これは遺伝学的な分類ではなく、いわゆる form genus (形態属) と呼ばれるもので、環境によって異なった形状を取っているが実は同じ種かも知れないのである。サンゴのゲノムや遺伝学的研究はこれからの分野である。

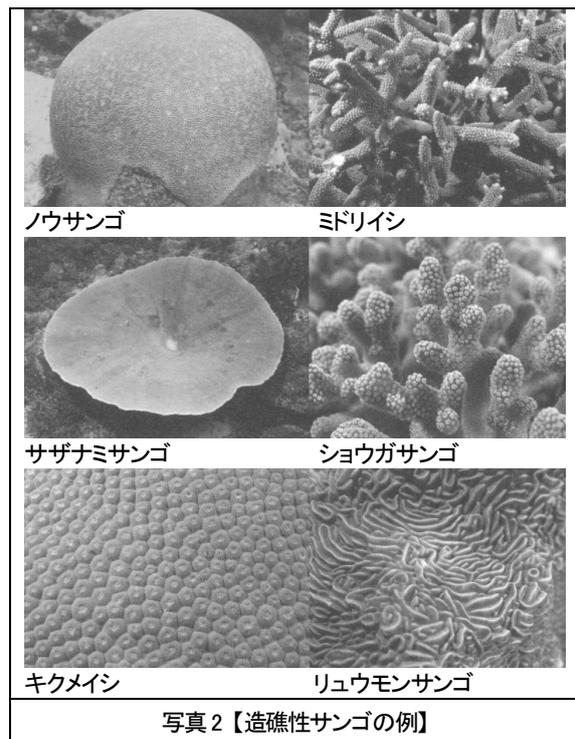
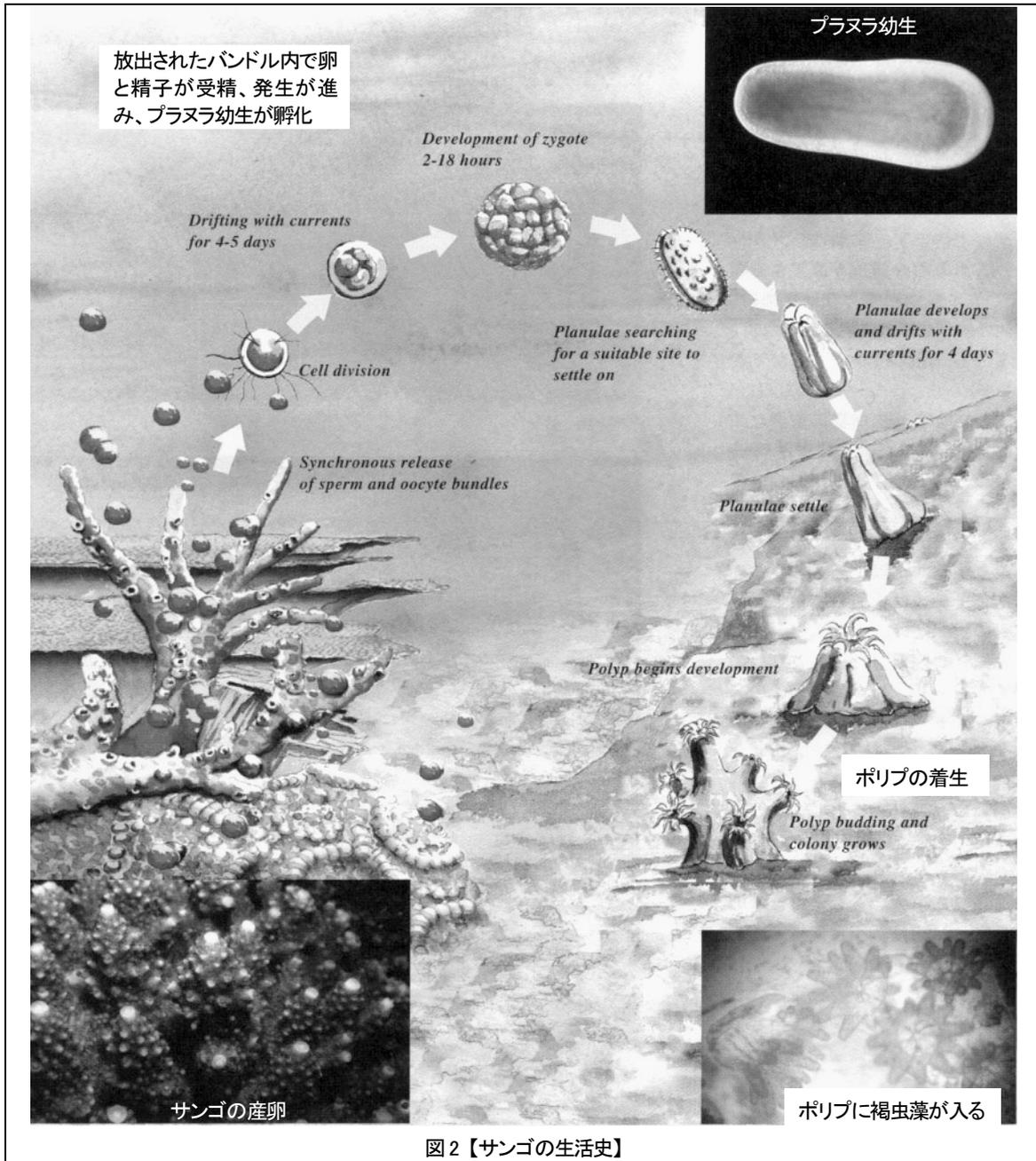


写真2【造礁性サンゴの例】

## ■サンゴの生活史

サンゴの性は、一個体のポリプの中に卵と精子の両方を作る雌雄同体の種と、どちらか一方だけを作る雌雄異体の種がある。ミドリイシ科やキクメイシ科、サザナミサンゴ科などの多くの種は雌雄同体、クサビライシ科やチョウジガ

イ科、キサンゴ科では雌雄異体の種が多く見られる。一株のサンゴ個体、つまりポリプの集合体（ポリプ群体）は、一個の受精卵から発生した単一ポリプが分裂を繰り返してできた遺伝的には同一のクローンの集合体である。



サンゴの産卵として有名な直径約 1mm のオレンジ～ピンク色の球は、実は、雌雄同株のサ

ンゴの、数個の卵母細胞と精巣と一緒に入った「バンドル」と呼ばれるカプセル。この段階で

は受精していない。水中を浮遊中に、卵母細胞と精巣が分離し、精巣膜が分解する。海面付近で他の多くのバンドルから遊離した卵や精子との間で受精が起こり、卵割を経て、プラヌラ(planula) 幼生が孵化する。プラヌラ幼生は流れに乗り浮遊した後、岩礁などに着底し、ポリプへと分化(変態)する。これが無性的に分裂し、多数のポリプからなるポリプ群体を形成する。つまり、一株のサンゴ体を構成する多数のポリプは互いに遺伝的に同一のクローンなのである。ポリプの分裂は、一つのポリプから芽を出すように多数のポリプが分岐していくように見え、出芽(budding)と呼ばれる。群体はさらに出芽を繰り返しながら、成長を続けていく。

こうして成長した造礁性サンゴは、石灰質の殻を持つシャコ貝や有孔虫などとともサンゴ礁を形成する。サンゴ礁は生物集団の生態系であるだけでなく、立体的な地形でもある。サンゴ礁生態系が非常に高い生物生産力を持つ理由の一つに、この地形形成性がある。即ち、造礁性サンゴの様々な形態や空間的配置が、枝が込み入ったり、陰が増えたり、重なりができたりと複雑な地形、いわば空間的多様性が生まれる。様々な形態の空間が様々な種の生物の隠れ家となったり、コブシメ(甲イカ)などの産卵場所となることで、生物の種多様性を保持する働きを持つ。

### ■サンゴと光合成

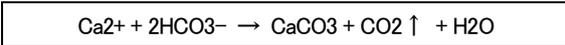
サンゴというと思い浮かぶのが光合成、そしてそれに伴う炭酸ガス(二酸化炭素)の固定化(石灰化)の話題である。ストロマトライトが太古の地球上で酸素を生み出したように、現在はサンゴ礁が海の中の酸素生産の主役を担っている。ただし、サンゴ礁における光合成の主役は動物であるサンゴ自体ではなく、サンゴの体内に共生している植物プランクトンの一種の

褐虫藻である。褐虫藻が光合成を行い、宿主であるサンゴに栄養分を供給しているのである。褐虫藻については後に詳しく述べる。

### ■サンゴ礁における炭酸ガスの固定化

本誌443号に書いたように、ストロマトライトは粘液を出すことで砂粒などを付着して層状の構造物を形成したものである。一方、造礁性サンゴは海中に溶存する炭酸イオンを取込んで体内で炭酸カルシウム(石灰)を合成し、自らの骨格構造を作る。そこで、サンゴ礁は炭酸ガスの固定化能を持つのではないかと大いに注目されるようになったのである。

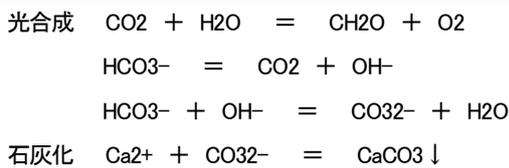
サンゴは光合成のために炭酸ガスを吸収する一方、呼吸もするので、炭酸ガスを排出もする。中には、サンゴも死ぬと石灰質は分解するから炭酸ガスも元に戻り、吸収の効果はあまり無いという人も出てきた。さらに、炭酸カルシウムを合成する反応で炭酸ガスが放出されるという指摘も出てきた。



自然のサンゴ礁での炭酸ガスの収支を直接測るのが難しかった為、*in vitro*、つまり実験室内での実験が多数行われた。試験管内でサンゴポリプの光合成産物を測定するなどした*in vitro* 実験では否定的な報告が多く寄せられた。しかし、*in vitro* 実験で使うサンゴは、海中で自然に生育しているサンゴ礁の様に群を成しておらず、しかも海中のサンゴ礁は生きて成長を続けているのであるから、*in vitro* では正しく評価できないのである。

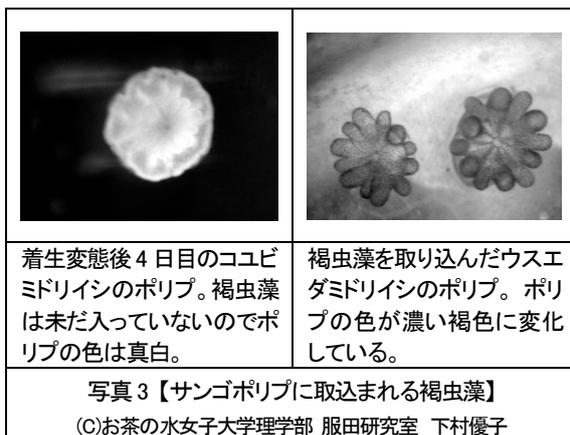
そこで、東京大学の茅根創教授が沖縄・石垣島海中のサンゴ礁に測定装置を設置し、海水中の炭酸ガス濃度とアルカリ度の変動を1年を通して連続的に調べたところ、サンゴ礁内では、大気中や礁外と比べて確かに炭酸ガス濃度が低

くなっていることを明らかにした。さらにパラオ諸島では、より高精密な自動計測に成功し、サンゴ礁では光合成による炭酸ガス固定が、呼吸や石灰化による炭酸ガス放出を上回ることを実証した。生きているサンゴ礁の現場で (in situ) 観測することで、in vitro 実験の結果を覆したのである。



### ■サンゴと褐虫藻の共生

サンゴは刺胞動物門に属する動物であるから、葉緑体を持っているわけではなく、光合成はサンゴの細胞内に共生している褐虫藻の働きである。褐虫藻は藍藻（シアノバクテリア）のような原核生物（細菌の仲間）ではなく、夜光虫などが含まれる渦鞭毛藻類の仲間、真核生物の藻類である。サンゴポリプ内に入り、光合成産物である炭水化物をサンゴに与えるいわゆる共生生物である。また、褐虫藻はミトコンドリアのようにサンゴの受精卵から内在しているのではなく、プラナラ幼生が岩礁に着生してポリプに分化した後に、周辺の海中を漂う褐虫藻がポリプの細胞内に取込まれるのである（写真3）。



褐虫藻がサンゴに与える炭水化物のかかなりの部分が粘液としてサンゴから滲出しているのだが、その粘液がサンゴ礁内に浮遊する栄養分を効率よく捕捉する働きを担っていることが示されている。潮流が栄養を捕捉した粘液集合体を寄せ集めることで、礁湖 (lagoon) 内のエネルギー循環ループが確立され、礁内の生物生産性を支えると同時に、エネルギーや栄養分の流出を減らしていると考えられる。

なお、サンゴの色鮮やかな色彩は、共生する褐虫藻の色素が反射する光の色であるが、その色の多様性は褐虫藻の種類と持っている色素の違いによるものである。かつて、褐虫藻は *Symbiodinium microadriaticum* 1種のみと考えられてきたが、近年多くの遺伝子多型が見つかり、少なくとも7つのクレイド (clade: 単一系統群) に分類されることが分かってきた。しかし、サンゴと褐虫藻の共生に関わる遺伝子群や分子メカニズムは未だよく知られていない。

実は、サンゴ礁での光合成はサンゴだけでなく、シャコガイなどの貝類（軟体動物）やホシズナなどの有孔虫（原生生物）のほか、円石藻やサンゴ藻などの石灰藻（植物）にも見られる。また、既に化石になっている古生物では、ウミユリ（棘皮動物）やフズリナ（有孔虫の仲間）もまた光合成を行い、炭酸ガスを石灰に固定して石灰の殻や骨格を作っていたとされる。これらの光合成もまた、褐虫藻によるもので、褐虫藻はサンゴの他、シャコ貝やイソギンチャク、有孔虫などとも共生関係にあり、多様な「光合成動物」（比喩的表現）を生み出す。シャコガイの青や紺色の美しい外套膜の色も、膜中に共生している褐虫藻の色素の反射によるものである。シャコガイの2メートルを超えることもある巨大な貝殻もまた、褐虫藻の光合成に伴って炭酸ガスが固定された産物に他ならない。イソギンチャクの触手もまた、褐虫藻の共生により、深い緑色や赤褐色など、様々なバリエーションが

見られる。

### ■サンゴの白化

このように褐虫藻は、サンゴ個体はもとより、サンゴ礁生態系全体の維持に必須の共生生物であるが、サンゴが高温や紫外線あるいは他の環境変化によるストレスを受けると、簡単に共生関係は崩れる。宿主であるサンゴが共生している褐虫藻を放出し、褐色や緑色などに染まっていたサンゴ骨格が白骨のように白くなる白化(bleaching)現象が知られている。ストレスの程度によりすぐに回復する場合もあるが、褐虫藻を再び取り込めない場合、サンゴは死滅する。

1998年、エル・ニーニョの影響で、観測記録が残っている1860年以來の最高気温を記録し、30°Cを越す高水温域が広がり、主に北半球のサンゴ礁は白化により大打撃を受けた。2007年にも、エル・ニーニョやラ・ニーニャの影響と思われる海水温の急激な上昇により、世界各地の海で大規模なサンゴの白化が観測された。現在は徐々に回復しているという報告もあるが、傷跡は今なお深い。

白化のメカニズムについては諸説がある。高水温下では褐虫藻の光合成能の低下が見られることから、高温ストレスの感受性は宿主サンゴより褐虫藻のほうが高く、褐虫藻の光合成低下が引き金となって褐虫藻の排出に繋がるという説がある一方、高温処理で排出された褐虫藻の光合成能が必ずしも低下していないことから、光合成能低下が直接の引き金でなく、宿主サンゴと褐虫藻との相互作用が高温によって影響を受けて褐虫藻の排出が起こるといった説もあり、決着はついていない。

高温ストレスが何に影響を与えているかについては、光合成の明反応(光化学系)と暗反応(炭素固定回路)のうち、暗反応に関わる酵素に影響を与え、炭素固定回路の回転が低下し、余剰の高エネルギー電子が周囲の酸素と結合し

て活性酸素を生じ、これが明反応にダメージを与えるという「白化の光阻害仮説」が有力である。活性酸素は褐虫藻自体の細胞の損傷や破壊も引き起こすので、高温下では、宿主サンゴは先ず損傷した変性褐虫藻を排出すると考えられた。しかし、30-32°Cの高温ストレス下でアザミサンゴより排出される褐虫藻とサンゴ組織内に残った褐虫藻とを比較した結果、高温下では宿主サンゴがまず生理的に何らかの影響を受け、光合成能が正常な褐虫藻を排出することが分かった。高温下では、正常な褐虫藻の排出がパニック的に暴走して起こる可能性も示唆される。

その一方、褐虫藻内にある褐色の光合成に関わるカロテノイド色素ペリジニンの濃度を、健康なサンゴと高温ストレス処理したサンゴとで比較したところ、白化しても褐虫藻自体はほとんど排出されず、サンゴ内で色素が分解、あるいは喪失するという結果も報告されている。色素は失ったもののサンゴ組織内で生存する褐虫藻も確認され、白化が必ずしも褐虫藻の排出だけで説明されるわけではないことを示している。

このように白化のメカニズムについては明確な結論が得られていないが、悲観的な見方が多い中、褐虫藻の放出をサンゴ自体が持つ環境適応メカニズムとして捉える説も提唱されている。褐虫藻の遺伝的多型は、褐虫藻の持つ酵素活性に関係すると考えられることから、異なるクレイド(系統群)の褐虫藻を獲得すれば、高水温に適応して生き延びられたり、逆に低水温に適応できるという可能性がある。このような環境変化に応じて、組む相手を変える手段として、ハイリスクであるが、褐虫藻を一旦全放出し、別の遺伝的性質を持った褐虫藻に入れ替えを図っているのではという仮説である。

### ■サンゴの年輪と気候変動

ストロマトライトや縞状鉄鉱層の重層構造の中に当時の環境を物語るデータが書き込まれて

いるように、実はサンゴの石灰質の骨格にも、成長に伴い重層されていく樹木の年輪のような構造があることが、X線撮影や放射性同位元素のオートラジオグラフによって認められる(写真3)。これが自然環境の推移を記録していることも知られている。大気や海洋など地球の古気候や古環境の推移変遷を記録しているという意味で、サンゴカレンダーと言われることもある。人骨の場合、その年の栄養状態の善し悪しによる成長の差が、飢餓線として残るが、同様に、サンゴの成長も年次差があり、成長線が残り、環境の変化を記録するものとして重要である。例えば、ある年代に相当する年輪部分に含まれる酸素同位体比率(18O/16O)を分析することにより、多雨であったか少雨であったかなどが分かるため、この方法でエルニーニョをはじめ様々な気候変動メカニズムの解析や古環境の復元的研究がなされている。

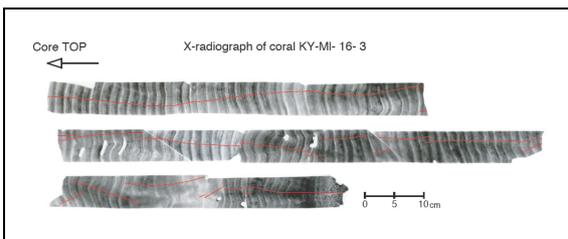


写真3【サンゴの骨格年輪の例】  
造礁サンゴでは成長とともに骨格が同心球状に付加されてゆく。年輪の明るい層と暗い層はそれぞれ骨格密度の低い部分と高い部分に相当し、明暗1対で1年を表わす。年輪幅は1 cm程度である。

### ■自然が重ね綴った構造体から見つめなおす地球の未来

今回、地球生命誌を記録した構造体としてのストロマトライト、縞状鉄鉱床、サンゴ礁を取りあげた。原始の地球環境はシンプルで、シンプルであるゆえに、複雑な世界の元となるストロマトライトのような構造ができたのである。443号に述べたように、西オーストラリアの特定の湾でのみ、現在も成長するストロマトライト

トを見ることができる。それは非常に微妙なバランスの上で成立している。

近年の地球環境の変動により、世界中のサンゴ礁は大きなダメージを受けている。これを解決・克服すべく、サンゴ礁の再生・人工増殖技術の開発も進んでいるが、まだまだ道程は遠い。

近代日本の産業は、製鉄・鉄鋼が支えて発展してきた経緯がある。この鉄資源は、主にオーストラリアの縞状鉄鉱層からもたらされたものである。千葉の港に運ばれた鉄鉱石が日本で精錬され、鋼になっていったのである。一方、日本の地質資源として、石灰石が輸出されており、鉄とともに基幹産業を成していたのであるが、この石灰石こそ、太古のサンゴ礁の光合成の遺産なのである。日本の近代化と経済発展の礎には、地球・生命誌を物語る縞状鉄鉱層やサンゴ礁の光合成の恩恵があったということを、科学技術や産業経済に関わる人々は、是非心に留めておくべきであろう。

執筆者：川口伸明

サイエンス・プロデューサー、薬学博士(分子生物学・発生細胞化学)。東京大学大学院修了。元・株式会社アイ・ピー・ビー取締役。知的財産戦略コンサルティングやバイオベンチャーの育成支援などに尽力している。



キクメイシ(サンゴ)の化石(門田真人氏所蔵)。伊豆・丹沢の石灰岩層には50種に及ぶ造礁性サンゴなど熱帯性生物化石に富む。1500万年前、フィリピンプレートが運んできた熱帯の島々がぶつかってできたのが今の伊豆半島であり、その衝撃で盛り上がってきたのが丹沢山塊。