

宮田昌彦\* 岡崎恵視\* 古谷庫造\*: 石灰褐藻オキナウチワの  
炭酸カルシウム沈着部位と結晶型について  
(藻類の炭酸カルシウム沈着の研究 1)

Masahiko MIYATA\*, Megumi OKAZAKI\* and Kurazo FURUYA\*: Site  
and nature of calcium carbonate deposits in a calcareous brown  
alga *Padina japonica* (Studies on the calcium carbonate  
deposition of algae-I).

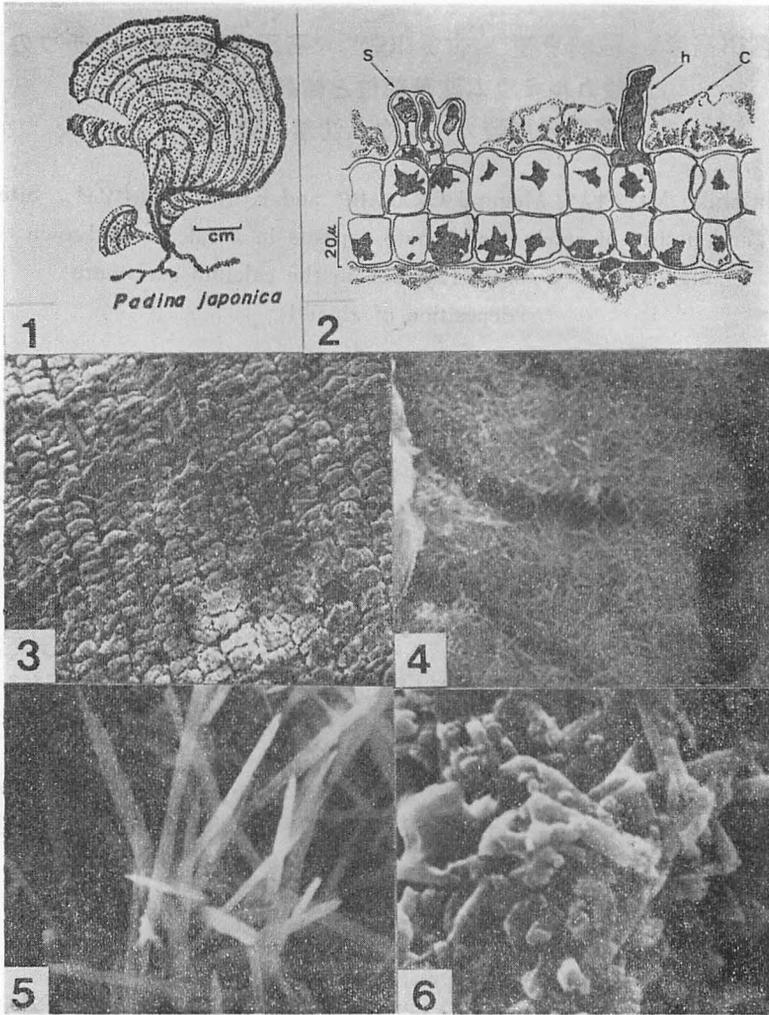
石灰藻とは、藻体に多量の  $\text{CaCO}_3$  を沈着する藻の総称であり、系統分類学的には、藍藻、黄色鞭毛藻、紅藻、褐藻、緑藻、車軸藻などの植物門に広く分布している。またこれら石灰藻に見られる  $\text{CaCO}_3$  の結晶型には、方解石型およびアラレ石型の2型が知られ、種によりいずれか一方の結晶型のみに限られており、両方の結晶型をもつ藻はいまだ報告がない<sup>1)</sup>。これら石灰藻がどのような機構で  $\text{CaCO}_3$  を沈着するのか、幾つかの仮説が提唱されているが、いずれも最終的な証明に欠けているのが現状である。著者らは、石灰化が藻体のどの部分に、さらには、細胞のいかなる部位に生ずるのかといった形態学的知見が有力な手掛りを与えるものと考えている。このような観点から、最近、Borowitzka ら (1974)<sup>2)</sup> は、石灰藻の  $\text{CaOC}_2$  沈着部位を基礎にして、石灰藻を3つの型に分類することを試みた。この研究は、すべての石灰藻に共通した石灰化機構を考えるよりも、種に応じて、幾つかの石灰化機構が存在することを示唆した。

著者らは、乾燥重量の約21%が  $\text{CaCO}_3$  からなるウミウチワ属オキナウチワ *Padina japonica* の  $\text{CaCO}_3$  沈着部位を走査型電子顕微鏡を用いて、またその結晶型を透過型電子顕微鏡で電子線回折により検討したのでその結果を報告する。

### 材料と方法

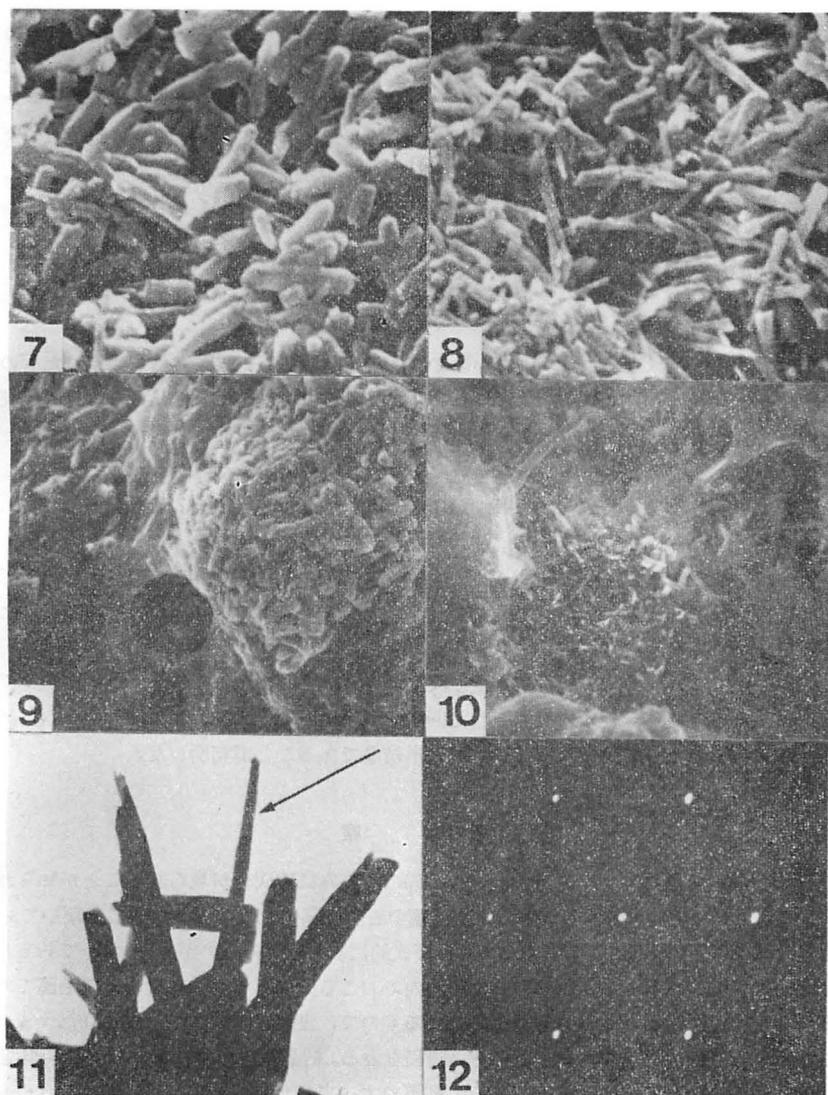
オキナウチワ *Padina japonica* OKAMURA は、1975年、能登半島、九十九湾にて採集した。採集直後の藻体を蒸留水で簡単に水洗後、風乾したものを観察試料とした。オキナウチワは、石灰化が著しく、白く見える上面(腹面)と、比較的石灰化の少ない下面(背面)の区別があり、さらに縁辺生長するので比較的 age の若い縁辺部と古い基部がある。そこで藻体の上下(腹背)両面の縁辺部と基部についてその表面を観察した (Fig. 1)。

\* 東京学芸大学生物学教室 (184 東京都小金井市貫井北町 4-1-1)  
Department of Biology, Tokyo Gakugei University, Koganei, Tokyo, 184 Japan.  
Bull. Jap. Soc. Phycol. 25: 1-6. 1977.



Figs. 1—6. *Padina japonica*

1. Upper surface view of the thallus. On both surfaces many calcareous bounds are observed (not shown in figure). The heavy deposition of the  $\text{CaCO}_3$  is evident by its whitish color of the upper surface. 2. Longitudinal section of the thallus, showing the two layers in close contact. c: deposits of  $\text{CaCO}_3$ , h: hair, s: sporangium. 3. Lower surface view of the basal part. Outside surfaces of the individual cells are covered with massive deposits of  $\text{CaCO}_3$  ( $\times 300$ ). 4. Upper surface view of the basal part. Outside surfaces are covered with many needle-like crystals ( $\times 2,200$ ). 5. Needle-shaped crystals on the upper surface of the marginal part ( $\times 17,000$ ). 6. Lod-shaped crystals on the lower surface of the marginal part ( $\times 10,000$ ).



Figs. 7-12.

7, 8. Lod-shaped crystals on the upper (7) and lower (8) surfaces of the basal part ( $\times 10,000$ ). 9, 10. Crystals of indeterminate structure (9: crystals on the lower surface of the marginal part,  $\times 4,500$ . 10: crystals on the lower surface of the basal part,  $\times 2,200$ ). 11. Transmission electron micrograph of the needle- and lod-shaped crystals on the upper surface of the marginal part ( $\times 20,000$ ). 12. An electron diffraction pattern obtained from one crystal (arrow) shown in 11. These crystals were identified to be aragonite single crystal.

観察に先だち、藻体小切片をカーボンと金で蒸着した。また透過型電子顕微鏡で結晶の電子線回折を行うための試料は、乾燥藻体をそのまま銅メッシュ上にドータイトで貼り付けた。さらに光学顕微鏡による藻体内部構造の観察には、採集直後の藻体小切片をグルタルアルデヒド、オスミック酸2重固定し、アルコールシリーズで脱水したのち、常法に従ってエポン包埋し、これより作った比較的厚い切片をトルイジンブルーで染色した。使用した走査型および透過型電子顕微鏡は、日本電子製 JSM-50A, JEM-7 である。

## 結 果

オキナウチワの縁辺部から基部にかけての縦断面の一部を光学顕微鏡で観察したものが Fig. 2 である。藻体は、いずれの部分も2層の細胞層からなっている。また藻体表面の上下(腹背)両面の縁辺部と基部の4部位について走査型電子顕微鏡で探査したところ、細胞1個を単位とする針状あるいは棒状結晶塊が観察された(Figs. 3, 4)。これらの部位で見られる針状結晶は、巾約  $0.2\ \mu\text{m}$ 、長さ  $5\ \mu\text{m}$  に達するものもあり(Fig. 5)、またこれとは別に、巾  $0.3\ \mu\text{m}$ 、長さ  $3\ \mu\text{m}$  程度の棒状結晶も多く認められた(Figs. 6, 7, 8)。さらに、これらの針状、棒状結晶が溶解して再結晶化したと思われる不定形の結晶像をしばしば観察したが、これは上下(腹背)両面の特に age の進んだ基部において顕著に見られた(Figs. 9, 10)。

Fig. 11 は、針状および棒状結晶型を決定するために、これらを透過型電子顕微鏡で観察したものである。その結果得られた回折像が Fig. 12 である。この回折像から、針状、棒状両結晶ともアラレ石型  $\text{CaCO}_3$  の単結晶であることが判明した。

## 考 察

褐藻のなかではウミウチワ属のものの一部の種のみ石灰化が見られることが知られている。Borowitzka (1974) ら<sup>2)</sup>は、石灰藻の石灰化部位を次の3つの型に分類している。その記述をもとに、著者らがこれを模式的に表わしてみたのが Fig. 13 である。すなわち、(1) **A型**: 石灰化が最初に細胞内でおこる型である。これは黄色鞭毛藻での石灰化、すなわちココリス形成に見られるもので、まずゴルジ体で形成されたココリスが細胞表面に押し出されるといった過程をとる。結晶型は方解石型である。(2) **B型**: 細胞壁そのものが石灰化する型である。紅藻のすべてのサンゴモ科の藻に認められるもので、結晶型は方解石型である。(3) **C型**: 海水に直接接する細胞表面、あるいは細胞壁最外層を含む細胞表面に石灰化が起る型である。これは、褐藻類のウミウチワ属、緑藻類のサボテングサ属、紅藻類のウミゾウメン目などの石灰藻で見られる。これらは、すべて針状のアラレ石型の  $\text{CaCO}_3$  を沈着するのが特徴である。

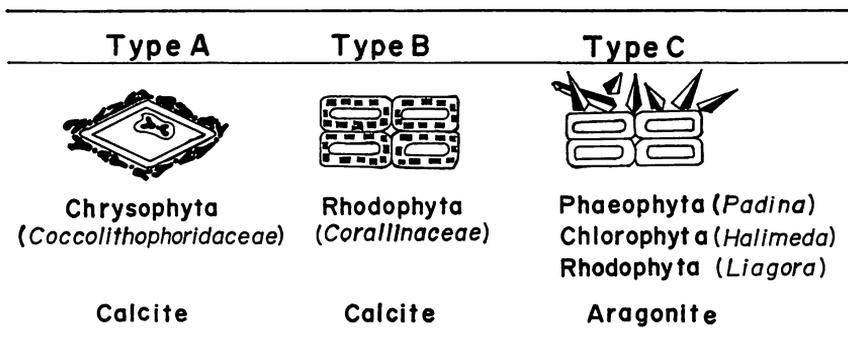


Fig. 13. Types of calcification process arranged according to the site of initial formation of  $\text{CaCO}_3$  deposits. This figure was made mainly from the description of Borowitzka et al. (1974).

以上のような観点から見ると、著者らが今回オキナウチワで得た結果は、この(3)の型に属し、石灰化部位および結晶型とも彼等の知見とよく一致した。しかし、走査型電子顕微鏡による表面観察だけでは細胞壁中の石灰化を知ることができないと思われるので現在著者らは、超薄切片を作り、この点を検討中である。

従来からの藻類の石灰化機構に関する仮説を大別すると次の2つの仮説があげられる。その1つは、光合成時の pH の上昇に基づく  $\text{CO}_3^{2-}$  の増加が石灰化を促進するものであり<sup>3)</sup>、他の1つは、 $\text{Ca}^{2+}$  の能動輸送による濃縮機構や、光合成産物である有機物の石灰化への関与を重要視するものである<sup>4,5)</sup>。著者らは、オキナウチワのように藻体表面、すなわち海水と直接接する部位で石灰化が起るものは、前者の仮説で比較的簡単に説明がつくのではないかと考えている。ここでは示さなかったが、オキナウチワの表面に pH メーターの単一ガラス電極を当てて光合成時 (20 klux 照射下) と暗所において藻体表面の pH の変化を測定したところ、光合成時には、アルカリ側へ、また暗所では酸性側への明瞭な pH の変化が認められた。前述したように、藻体の age の進んだ基部付近では、しばしば一たん生成した結晶が溶解し、その後再結晶してできたと思われる不定形の像が見られたが、これと暗所における pH の酸性側への変化と何らかの関係があるのではないかと推定される。ところで、このような藻体表面での pH の上昇、下降は、非石灰藻にも当然起っていると思われるにもかかわらず、なぜ石灰化しないのかといった問題が残るが、そのような藻には、石灰化を阻止する何らかの特殊な機構なり、物質なりが存在する可能性も充分考えうる。著者らは、特に細胞壁を構成するある種の多糖類の性質がこの鍵をにぎっているのではないかと考え現在検討中である。

稿を終えるにあたり、材料採集に協力いただいた金沢大学能登臨海実験所の池森雅彦

博士, また走査型電子顕微鏡の撮影に援助いただいた日本電子株式会社の植野亮, 幡場良明の両氏, 日本歯科大学の大島海一氏, および電子線回折に助言をいただいた東京学芸大学物理学教室の古田昇教授に深くお礼申し上げる。

### Summary

In the present paper the surface fine structure and the nature of calcium carbonate crystals of a calcareous brown alga *Padina japonica* were described.

The algal surfaces were studied with a scanning electron microscope at the marginal and the basal parts of upper and lower sides of the thallus. The needle- and lod-shaped crystals were predominant on the entire surface of the thallus. The former was about  $0.2\ \mu\text{m}$  wide and up to  $5\ \mu\text{m}$  long, and the latter was about  $0.3\ \mu\text{m}$  wide and about  $3\ \mu\text{m}$  long. Among these crystals, the patches of another type of crystals of indeterminate appearance were observed. These crystals seemed to be recrystallized from resolved needle- or lod-shaped ones.

The nature of needle- and lod-shaped crystals were identified to be aragonite by selected-area electron diffraction.

### 引用文献

- 1) LEWIN, J. C. (1962) Calcification. In Lewin, R. A. "Physiology and Biochemistry of Algae". New York and London: 457-465.
- 2) BOROWITZKA, M. A., A. W. D. LARKUM and C. E. NOCKLDS (1974) A scanning electron microscope study of the structure and organization of the calcium carbonate deposits of algae. *Phycologia* 13: 195-203.
- 3) BLINKS, L. R. (1951) Physiology and biochemistry of algae. In SMITH, G. M. "Manual of Phycology". Waltham, Mass: 263-291
- 4) PAASCHE, E. (1964) A tracer study of the inorganic carbon uptake during coccolith formation and photosynthesis in the coccolithophorid *Coccolithus huxleyi*. *Physiol. Plant. Suppl.* 3: 1-82.
- 5) PEARSE, V. B. (1972) Radioisotopic study of calcification in the articulated coralline alga *Bossiella orbigniana*. *J. Phycol.* 8: 88-97.