

藻類各種, 特に褐藻に対する二酸化 ゲルマニウムの生長阻害*

館脇正和・水野 真

北海道大学理学部海藻研究施設 (051 室蘭市母恋南町 1-13)

TATEWAKI, M. and MIZUNO, M. 1979. Growth inhibition by germanium dioxide in various algae, especially in brown algae. Jap. J. Phycol. 27: 205-212.

Germanium dioxide has been commonly employed by many investigators as a diatom-eliminating agent for seaweed cultures. In fact, many species of diatoms are eliminated in 2-week-old culture by the addition of 1~5 mg/l GeO₂ to the medium, except a few species. However, this germanium dioxide at more than 2.5~5 mg/l also inhibits the growth of all species of brown algae examined, although not that of other species belonging to the Chlorophyceae, Rhodophyceae, Dinophyceae, Haptophyceae and Chrysophyceae, excepting *Peridinium* sp. (Dinophyceae).

It is currently known that germanium inhibits silicon-uptake in diatoms, but in brown algae a germanium toxicity is not effective on the silicon-metabolism, because they do not require silicon for the growth. At present the only possible saying is that germanium dioxide should not be used to remove diatoms in brown algal cultures.

Masakazu Tatewaki and Makoto Mizuno, the Institute of Algological Research,
Faculty of Science, Hokkaido University, Muroran, Hokkaido, 051 Japan.

最近、海藻類の培養で粗培養から単種培養を得る過程において、除珪藻剤として二酸化ゲルマニウム (GeO₂) を培地 (培養液) に添加する方法が、多くの研究者によって採用されている。その添加量は、一般に培地 1 l 当り GeO₂ 5~10 mg が適当であるとされている。しかし、MCLACHLAN *et al.* (1971) は、ヒバマタ属 4 種類の培養で、5 mg/l 以上の高濃度の GeO₂ は、胚発芽体の頂部から壊死を起こさせることを見出し、さらに未発表資料として他の褐藻類も生長が抑制されることを述べている。このことから CHAPMAN (1973) は、GeO₂ の添加量は 0.5 mg/l で充分であるとしている。また、切田 (1970) は、スサビノリの糸状体培養において、除珪藻剤の GeO₂ の阻害効果を調べ、GeO₂ 30 mg/l で糸状体は阻害されて褪色するが、1~20 mg/l の濃度範囲では安全であり、珪藻の駆除効果としては 1~5 mg/l で充分であると報告している。

本実験では、除珪藻剤としての GeO₂ の阻害濃度、つまり、珪藻各種に対してそれらの生長を抑制し、再

び増殖が起らないための濃度を明らかにすると共に、海藻類各種の生長に対する GeO₂ の影響について確かめた。また、数種類の微細藻類についても実験を行った。その結果、材料として用いられた藻類のうちで、褐藻類のすべての種類が GeO₂ 2.5~5 mg/l 以上の添加量で、著しく生長を阻害されることが明らかにされたので報告する。

材料と方法

実験に用いられた海藻類の多くは、館脇の培養保存藻株を利用し、切片からの培養によった。ただし、ヒバマタ *Fucus evanescens*, エゾイシゲ *Pelvetia wrightii*, ウミトラノオ *Sargassum thunbergii* の受精卵や、ヘラリュウモン *Dumontia simplex* とダルス *Palmaria palmata* の四分胞子からの培養は、天然で採集した藻体から得られたものを用いた。珪藻類はすべて水野の培養保存藻株を用いた。比較実験のための渦鞭毛藻 3 種類は、内田卓志博士の培養藻株を、

* 本研究は文部省科学研究費 (No. 448018) による研究の一部である。

ハプト藻および黄金藻の各種は、PROVASOLI 博士の保存藻株を用いた。

培養は主として、14°C, 14時間照明の条件で行われたが、種類によって10°C, 10時間照明 (*Laminaria*, *Desmarestia*, *Petalonia*, *Dumontia*, *Palmaria*), 10°C, 14時間照明 (*Scytosiphon*), 20°C, 連続照明 (*Peridinium*, *Prorocentrum*) などの条件でも行われた。培地には補強海水 PES, PESI 液を用いたが、珪酸代謝との関連性を確かめるために, ASP₁₂ NTA-Base の人工海水も用いられた。また、珪藻の培養には, PES 液に Na₂SiO₃·9H₂O 20 mg/ℓ を加えたものを用いた。培養ガラス器具は主として、ねじ口試験管 (1.8×13.5 cm, 10 ml 入り) と腰高シャーレ (6.5×

8 cm, 180 ml 入り) を用いた。

GeO₂ の原溶液は, 1N NaOH 200 ml を 1 ℓ ビーカーに入れ, 加熱し煮沸させて, その中に GeO₂ (和光純薬, 特級) 500 mg を加え瞬間的に溶かし, 若干冷却させてから 1N HCl を徐々に加えて, pH 8.0 に調整し, 純水を加えて最終的に 500 ml とし, 1 ml=1 mg GeO₂ 溶液を作った。

結 果

1) 珪藻類各種における GeO₂ の阻害濃度

Table 1 に示した通り, 一般に 0.5~1 mg/ℓ の GeO₂ 濃度で生長は止まることがわかる。

次に, これらの種類がそれぞれ増殖しなくなる

Table 1. Effect of germanium dioxide on growth of diatoms. Growths after 14 days are shown in relative growth unit (%) to control (PES medium without GeO₂)

Species	mg GeO ₂ /ℓ				
	0.1	0.5	1	5	10
<i>Achnanthes brevipes</i> var. <i>intermedia</i>	99	5	0.6	0.6	0.6
<i>Chaetoceros simplex</i> var. <i>calcitrans</i>	2	0.1	0.1	0.1	0.1
<i>Gomphonema kamtschaticum</i>	94	1	0.8	0.8	0.8
<i>Licmophora gracilis</i> var. <i>anglica</i>	92	1	1	0.5	0.4
<i>Licmophora tenuis</i>	7	1	0.6	0.4	0.4
<i>Licmophora</i> sp.	94	2	0.5	0.5	0.5
<i>Melosira nummuloides</i>	81	11	3	3	3
<i>Navicula</i> sp. No. 1	6	1	1	1	1
<i>Navicula</i> sp. No. 2	98	2	0.5	0.5	0.5
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	99	87	33	4	2

Table 2. Growth recovery of various diatoms inhibited by different concentrations of GeO₂ for 2 weeks (from 1 month-old-cultures grown in GeO₂-free media)

Species	mg GeO ₂ /ℓ					
	0	0.1	0.5	1	5	10
<i>Achnanthes brevipes</i> var. <i>intermedia</i>	+	+	+	-	-	-
<i>Chaetoceros simplex</i> var. <i>calcitrans</i>	+	+	+	+	-	-
<i>Gomphonema kamtschaticum</i>	+	+	-	-	-	-
<i>Licmophora gracilis</i> var. <i>anglica</i>	+	+	+	+	+	-
<i>Licmophora tenuis</i>	+	+	-	-	-	-
<i>Licmophora</i> sp.	+	+	-	-	-	-
<i>Melosira nummuloides</i>	+	+	+	-	-	-
<i>Navicula</i> sp. No. 1	+	-	-	-	-	-
<i>Navicula</i> sp. No. 2	+	+	+	-	-	-
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	+	+	+	+	+	+

+ : growth observed and - : growth not observed.

GeO₂ の濃度で、果して死滅あるいは増殖不能となり、除去できるかどうかを試験した。この場合は、GeO₂ を添加した培地で2週間培養後、GeO₂ 無添加の培地に戻して1箇月培養し、再増殖の有無を観察した。

その結果は、Table 2 に示した通りである。

多くの種類は、GeO₂ 1 mg/ℓ で除去できるが、種類によってはやはり5 mg/ℓ 以上が必要になってくる。*Phaeodactylum* が混入した場合は、10~20 mg/ℓ でも除去できず、30 mg/ℓ 以上の濃度の GeO₂ を添加しなければならない。ただし、本実験では GeO₂ を添加した培地に2週間培養しただけで打ち切ったが、培養期間を長くすることによって、珪藻各種を除去できる GeO₂ 濃度は若干変わってくる。

2) 海藻類およびその他の藻類に対する GeO₂ の影響

除珪藻剤としての GeO₂ は、珪藻以外の藻類に対して生長阻害作用がないかどうかを調べた。その結果は、Table 3 に示した通りである（このほかに緑藻 *Ulothrix*, *Percursaria*, *Enteromorpha*, *Capsosiphon*, *Bryopsis*, 紅藻 *Bangia*, *Ceramium*, *Polysiphonia*, などの各種類についても実験したが、阻害作用が認められなかったので記載を省略した）。

この結果を見ると、褐藻類のみが、1~2種類を除いて1~2.5 mg/ℓ 前後の GeO₂ 濃度から生長が抑制され、すべての種類が5 mg/ℓ 以上で著しい生長阻害を受けることが明らかである。

マコンブ *Laminaria japonica* の場合は、雌雄両配

Table 3. Effects of germanium dioxide on growth of algae belonging to various classes (from 1- or 2-month-old cultures)

Species	mg GeO ₂ /ℓ		
	1-2.5	5-10	20-30
Chlorophyceae			
<i>Monostroma angicava</i>	—	—	—
<i>Ulva pertusa</i>	—	—	—
Phaeophyceae			
<i>Pilayella littoralis</i>	干	+	+
<i>Ectocarpus siliculosus</i>	干	+	+
<i>Sphacelaria radicans</i>	—	+	+
<i>Desmarestia viridis</i>	+	+	+
<i>Scytosiphon lomentaria</i>	干	+	+
<i>Petalonia fascia</i>	干	+	+
<i>P. zosterifolia</i>	+	+	+
<i>Laminaria japonica</i>	+	+	+
<i>Undaria pinnatifida</i>	+	+	+
<i>Fucus evanescens</i>	干	+	+
<i>Pelvetia wrightii</i>	—	+	+
<i>Sargassum thunbergii</i>	干	+	+
Rhodophyceae			
<i>Dumontia simplex</i>	—	—	干?
<i>Palmaria palmata</i>	—	—	—
<i>Antithamnion glanduliferum</i>	—	—	干?
<i>Antithamnion</i> sp.	—	—	干?
Dinophyceae			
<i>Gonyaulax catenella</i> (F.)	—	—	—
<i>Peridinium</i> sp.	—	干	+
<i>Prorocentrum micans</i>	—	—	—
Haptophyceae			
<i>Coccolithus</i> sp.	—	—	—
Chrysophyceae			
<i>Pavlova gyraus</i>	—	—	—

— : not inhibitory, 干 : slightly inhibitory, + : inhibitory, + : very inhibitory.

偶体の糸状切片を混ぜ合せて培養し、低温短日処理をすると、2週間前後で多数の孢子体が形成されてくる。この孢子体形成について観察したが、 GeO_2 0.5 mg/l から孢子体の発芽率は減少する傾向を示し、1~2.5 mg/l で孢子体の生長も抑制される。5 mg/l では卵と精子形成は僅かながらみられるが、同調しないため孢子体は形成されず、10 mg/l 以上では配偶体の糸状体もほとんど伸長しなくなる (Figs. 1~3)。これはワカメ *Undaria pinnatifida* やケウルシグサ *Desmarestia viridis* の配偶体の培養でも同じであった。

ピラエラ *Pilayella littoralis* やシオミドロ *Ectocarpus siliculosus* のような単列糸状性の種類も、 GeO_2 1~2.5 mg/l から生長が抑制され、5 mg/l からは直立糸状体の形成はほとんどみられなくなる (Fig. 4)。

カヤモノリ *Scytosiphon lomentaria* の場合は、配偶子を単為発生させて低温下で培養すると、匍匐糸状体および盤状体となり、2週間前後で多数の円柱状葉 (配偶体) が直立してくるが、 GeO_2 1~2.5 mg/l で盤状体は形成されなくなり、直立葉の形成も減少し、その伸長も抑制される。5 mg/l で小さな匍匐糸状体となり、直立葉の形成は稀である。20 mg/l では匍匐糸状体の伸長も著しく阻害されて、不規則な形の数十細胞の塊にとどまる (Figs. 5~8)。セイヨウハバノリ *Petalonia fascia* やホソバセイヨウハバノリ *Petalonia zosterifolia* なども、ほぼ同様な生長阻害を受ける。

ヒバマタ *Fucus evanescens* の受精卵からの発芽体では、 GeO_2 5 mg/l で頂部から崩壊し始める (2.5 mg/l

でも長期間培養を続けると崩壊してくる)。また、仮根の形成も抑制される。20~30 mg/l では受精卵は不規則な細胞分裂を繰り返すのみで、不定形の細胞塊となり、仮根の形成もほとんどみられなくなる (Figs. 9~13)。ウミトラノオ *Sargassum thunbergii* の受精卵の発芽体も、ほぼ同様に阻害されるが、エゾイシゲ *Pelvetia wrightii* の場合は若干抵抗性が強いようである。

以上のように、褐藻類は形態的にみても著しい損傷を受けるが、しかし、いずれの場合も、従来除珪藻剤として用いられてきた GeO_2 5~10 mg/l の濃度で生長を阻害されても、 GeO_2 無添加の培地に戻してやると、生長はかなり遅れるが回復してくることが多い。たとえば、ヒバマタの胚発芽体のように頂部が崩壊したものは、その部分が下部から修復されてくるか、その基部から新しい発芽体が再生される (Figs. 14, 15)。20~30 mg/l で1~2箇月培養を続けたものは、この濃度で死滅しないが、普通の培地に戻してもいじけた矮小体にとどまることが多いし、回復してくる場合も長期間の培養を必要とする。

これらの褐藻類に比べて、緑藻類や紅藻類は、高濃度でもほとんど生長を阻害されることがない。ただ、 GeO_2 20~30 mg/l でフタツガサネ属 *Antithamnion* spp. では、褪色現象が比較的早く現れてきたし、ヘラリュウモン *Dumontia simplex* で盤状体からの直立葉の形成が遅れる傾向がみられたが、形態的な損傷は認められなかった。

Figs. 1-3. *Laminaria japonica*, from 2-month-old culture.

1. Many sporophytes produced on gametophytes, grown in control medium.
2. Dwarf sporophytes produced on gametophytes at 2.5 mg/l GeO_2 .
3. Short filamentous gametophytes at 20 mg/l GeO_2 .

Fig. 4. *Pilayella littoralis*, from 2-month-old culture at various concentrations of GeO_2 (mg/l). a, control; b, 0.1 mg; c, 0.25 mg; d, 0.5 mg; e, 1 mg; f, 2.5 mg; g, 5 mg; h, 10 mg; i, 20 mg; j, 30 mg.

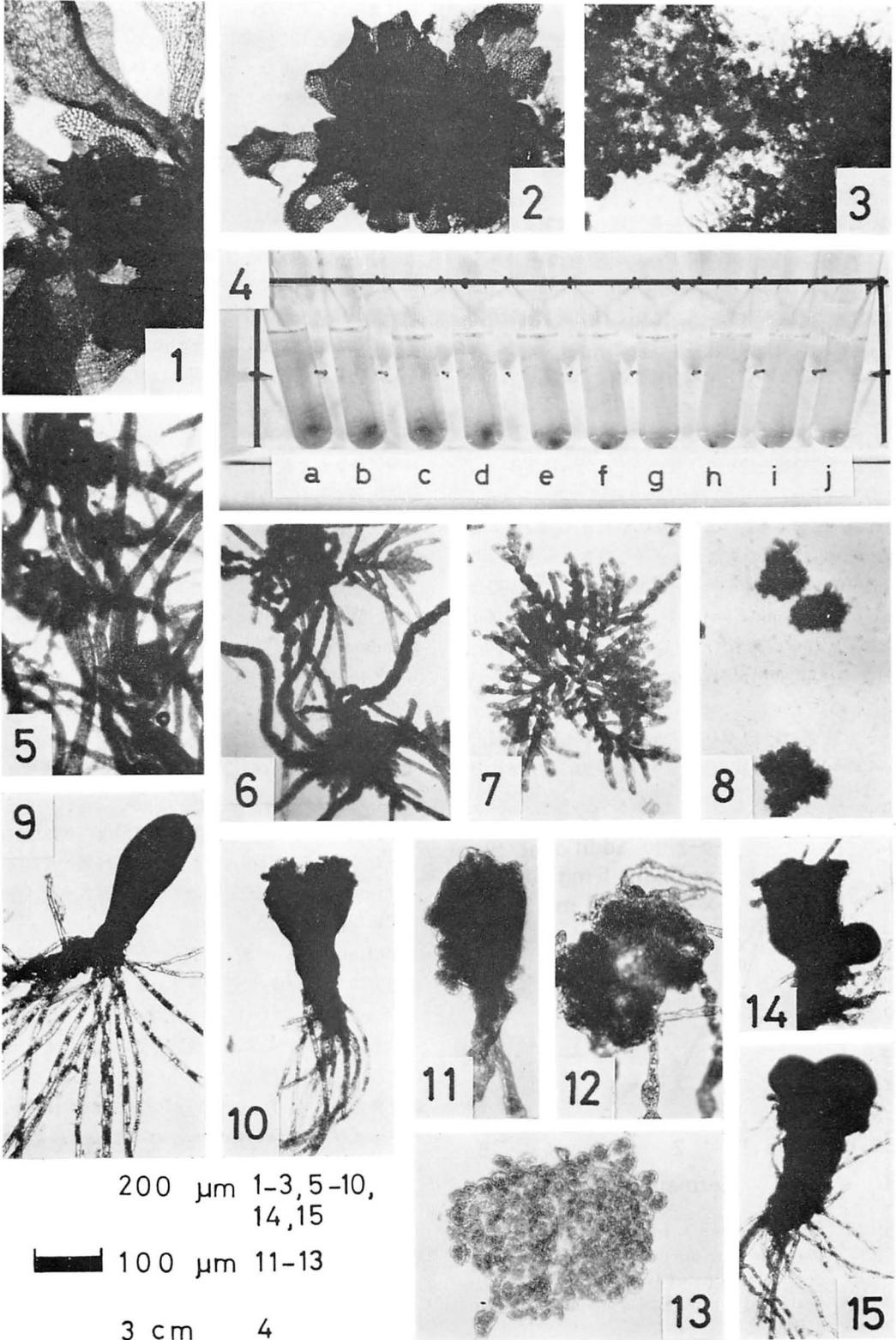
Figs. 5-8. *Scytosiphon lomentaria*, from 1-month-old culture.

5. Many cylindrical thalli produced on crusts, grown in control medium.
6. A few cylindrical thalli produced on a crust and prostrate filaments, at 2.5 mg/l GeO_2 .
7. Short prostrate filaments without erect cylindrical thalli, at 10 mg/l GeO_2 .
8. Small masses containing very short filaments, at 20 mg/l GeO_2 .

Figs. 9-13. *Fucus evanescens*, from 25-day-old culture.

9. Embryo grown in control medium.
10. Embryo at 5 mg/l GeO_2 , induced apical necrosis (breaking).
11. Embryo at 10 mg/l GeO_2 .
- 12, 13. Breaking embryos at 30 mg/l GeO_2 .

Figs. 14-15. *Fucus evanescens*. Growth recovery of 1-month-old embryos transferred to GeO_2 -free medium, after inhibition at 10 mg/l GeO_2 for 25 days.



その他の藻類として、渦鞭毛藻、ハプト藻、黄金藻についての GeO_2 の影響は、実験に用いた種類数が少ないので明確な判断はできないが、著しい生長阻害は認められなかった。ただ、渦鞭毛藻の中で *Peridinium* sp. がその生育細胞数において、 GeO_2 0~2.5 mg/l に比べて 5 mg/l で 60%, 10 mg/l で 40%, 20~30 mg/l で 20% 台に減少して行くことが注目された。

3) 褐藻における GeO_2 の生長阻害と珪酸塩との関係

珪藻類の生長に及ぼす GeO_2 の阻害作用は、主としてその必須栄養素である珪酸の代謝が競合的に抑制されるためと考えられている。しかし、珪酸塩を栄養として要求しない褐藻類ではどうかを、カヤモノリ、ケウルシグサとヒバマタについて実験した。

そのうち、カヤモノリについての結果は、Fig. 16 に示した通りである。

これは珪酸塩を除いた人工海水 (ASP₁₂ NTA) に、珪素 (Si) 5 mg/l と 20 mg/l の 2 段階の濃度を加え、それぞれにゲルマニウム (Ge) 0.5, 1, 2, 3, 5 mg/l を加えているが、Si の有無およびその濃度にかかわらず、いずれも Ge 1 mg/l ($\equiv \text{GeO}_2$ 1.45 mg/l) で生長量は半減し、Ge 3 mg/l ($\equiv \text{GeO}_2$ 4.35 mg/l) では、単に 1~3 mm 程度の僅かな直立葉が見られるだけとなり、それ以上の濃度では、直立葉はまったく形成されないことを示している。

一方珪素は、Si 0.1~10 mg/l ($\equiv \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 1~100 mg/l) の濃度範囲で、Si 無添加の場合と生長

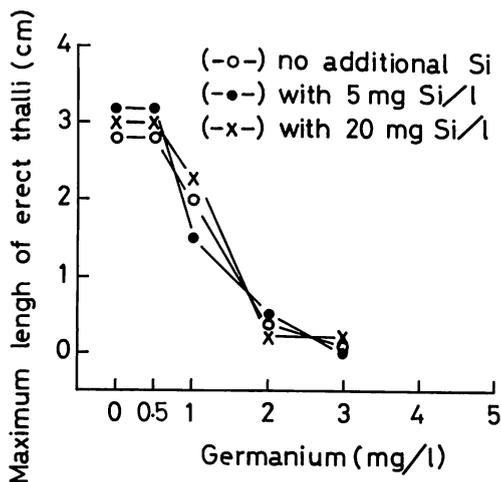


Fig. 16. Growth after 1 month of *Scytosiphon lomentaria* in media containing various concentrations of Germanium (as GeO_2) with and without Silicon (as $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$).

量はまったく変わらない。このことは、カヤモノリは珪酸を栄養塩として要求していないし、また、高濃度で阻害されることもなく、ゲルマニウムの毒性は珪素の存在とは無関係であることを示している。

このカヤモノリの場合と同様の結果が、ケウルシグサとヒバマタでも得られた。

考 察

LEWIN (1966) は、珪藻類の必須要素として珪酸の要求性を明らかにする一連の研究において、珪藻の生長が二酸化ゲルマニウム (GeO_2) によって著しく阻害されることを見出し、WERNER (1966) もこの事実を見出し、他の緑藻や藍藻には無毒であることを報告した。それ以来、ゲルマニウムと珪素とが化学的に類似した元素であることから、珪藻類の珪酸代謝にゲルマニウムが拮抗的に作用し、珪酸の取り込みを阻害すると考えられ、各種珪藻に対するゲルマニウムの生長阻害効果は、Ge と Si のモル比によって表わされている。確かに珪藻では、珪酸の量によってゲルマニウムの阻害効果が異なってくるのは事実である (LEWIN 1966, WERNER 1966, 1967 a, 1977, WERNER & PETERSEN 1973)。しかし、他の藻類の中で、特に褐藻類だけが著しい生長阻害を受けるということは、珪酸代謝とは無関係なゲルマニウムの毒性作用を示唆している。褐藻類には珪素を体内に蓄積している種類が知られているが、栄養塩としてそれを要求する例は報告されていない。

本実験でも、カヤモノリなどで珪酸塩の要求性は、まったく認められなかったし、また、珪素の量によってゲルマニウムの生長阻害効果が現われる濃度の変動は認められなかった。

MCLACHLAN *et al.* (1971) はヒバマタ属 4 種類の培養実験で、それらの胚発芽体および成体の頂端部分が、5 mg/l 以上の GeO_2 濃度で壊死を起こすこと、さらに未発表資料として、褐藻類の他の種類でも GeO_2 による生長阻害が認められることを述べているが、詳細は発表されていない。また、MCLACHLAN (1977) はヒバマタの 1 種 *Fucus edentatus* の胚発芽体の栄養要求の研究から、珪酸の要求性がまったくないことを明らかにし、 GeO_2 の毒性は珪酸代謝と無関係ではないかという疑問を述べている。この問題は今後さらに多くの種類を対象にして検討しなければならないが、本実験から褐藻類はその体構造、世代の違いなどにかかわらず、いずれも 2.5~5 mg/l 以上の GeO_2 濃度によって著しく生長が阻害されることが明らかにされた。⁵

さて、 GeO_2 によって珪藻類が阻害されるのは、珪酸の代謝系ばかりでなく、クロロフィルの合成、クロロプラスト中の酵素の生合成の阻害も知られ、さらに高等植物のクロロフィル阻害の例も報告されている(WERNER 1967 a, b)。ここで、珪藻類と褐藻類について色素系を中心に共通点を考察してみると、クロロフィル a, c を持つこと、そのほかにカロチンとして β -カロチンを持ち、キサントフィルとしてジアトキサンチン、ジアジノキサンチン、フィコキサンチンなどを持っていることが挙げられる(MEEKS 1974, GOODWIN 1974, 巖佐 1976)。しかし、これらの色素は黄金藻とも共通し、渦鞭毛藻やハプト藻とも類似点が多い。ただし、現在まだ報告されている例は少ないが、クロロフィル c について、Chl. c_1 と Chl. c_2 の両方を持っているのは、珪藻類、褐藻類として黄金藻類に属する種類で知られている(JEFFREY 1969, 1972)。本実験で用いられた黄金藻の *Pavlova gyraus* は GeO_2 の影響をまったく受けていない。しかし JEFFREY *et al.* (1975) によると渦鞭毛藻に属する種類の多くは、Chl. c_2 だけを持ち、カロチノイドとしてペリジニンを持っているが、*Peridinium* や *Exuviella* の種類では、Chl. c_1 と Chl. c_2 の両方を持ち、カロチノイドもフィコキサンチンである。本実験で用いられた *Peridinium* sp. についての色素系の分析はされていないが、高濃度の GeO_2 (20~30 mg/l) によって生育細胞数が対照の 1/5 に抑制されることから、ゲルマニウムによる生長阻害は、特に Chl. c_1 と Chl. c_2 を持つ種類に共通しているのではないかと考えられる。

本実験は GeO_2 の阻害効果について、形態と生長量を主体として観察しただけであり、また、文献による色素系の分析資料も充分でないので、Chl. c_1 と Chl. c_2 を持つという共通点からのみ考察することは危険であると思われる。しかし、これらの共通点について、クロロフィルの成分分析やクロロプラストの電顕による観察、栄養実験などを通じて、 GeO_2 の珪酸代謝阻害とは異なった毒性について、今後明らかにされる可能性があると思われる。

また、本実験から、除珪藻剤として GeO_2 を海藻類の培養に用いる場合は、珪藻類の多くの種類に対して GeO_2 1~5 mg/l の濃度で十分に効果があることが明らかにされた。さらに紅藻類や緑藻類の培養では、必要に応じて従来通り 5~10 mg/l の濃度で培地に添加しても差し支えないと思われる。しかし、褐藻の培養には 1 mg/l の濃度までで、高濃度でしかも長期間の使用は避けるべきであることが明らかにされた。そのた

め *Phaeodactylum* のような GeO_2 に抵抗力のある種類が培養に混入した場合は、ピペットなどを用いた機械的な洗浄法によって除去すべきであろう。

終りに本稿の御校閲を戴いた北海道大学、阪井與志雄教授、研究材料として培養藻株を提供された内田卓志博士とハスキンス研究所の PROVASOLI 博士、文献をお送り戴いた東京大学、市村輝宜博士に厚く御礼申し上げる。

引用文献

- CHAPMAN, A. R. O. 1973. Methods for macroscopic algae. p. 88-104. In J. R. STEIN (ed.) Handbook of phycological methods. Cambridge University Press, Cambridge.
- GOODWIN, T. W. 1974. Carotenoids and bili-proteins. p. 176-205. In W. D. P. STEWART (ed.) Algal physiology and biochemistry. Blackwell Sci. Pub., London.
- 巖佐耕三 1976. 珪藻の生物学. 東京大学出版会, 東京.
- JEFFREY, S. W. 1969. Properties of two spectrally different components in chlorophyll c preparations. Biochim. biophys. Acta 177: 456-467.
- JEFFREY, S. W. 1972. Preparation and some properties of crystalline chlorophyll c_1 and c_2 from marine algae. Biochim. biophys. Acta 279: 15-33.
- JEFFREY, S. W., SIELICKI, M. S. and HAXO, F. T. 1975. Chloroplast pigment patterns in dinoflagellates. J. Phycol. 11: 374-384.
- 切田正憲 1970. 除珪藻剤酸化ゲルマニウムがスサビノリ free-living 糸状体の生育におよぼす影響. 藻類 18: 167-170.
- LEWIN, J. C. 1966. Silicon metabolism in diatoms. V. Germanium dioxide, a specific inhibitor of diatom growth. Phycologia 6: 1-12.
- MCLACHLAN, J. 1977. Effects of nutrients on growth and development of embryos of *Fucus edentatus* PYL. (Phaeophyceae, Fucales). Phycologia 16: 329-338.
- MCLACHLAN, J., CHEN, L. C.-M. and EDELSTEIN, T. 1971. The culture of four species of *Fucus* under laboratory conditions. Can. J. Bot. 49: 1463-1469.
- MEEKS, J. C. 1974. Chlorophylls. p. 161-175. In W. D. P. STEWART (ed.) Algal physiology and

- biochemistry. Blackwell Sci. Pub., London.
- WERNER, D. 1966. Die Kieselsäure im Stoffwechsel von *Cyclotella cryptica* REIMANN, LEWIN und GUILLARD. Arch. Mikrobiol. 55: 278-308.
- WERNER, D. 1967 a. Hemmung der Chlorophyllsynthese und der NADP⁺-abhängigen Glycerinaldehyd-3-Phosphat-Dehydrogenase durch Germaniumsäure bei *Cyclotella cryptica*. Arch. Mikrobiol. 57: 51-60.
- WERNER, D. 1967 b. Untersuchungen über die Rolle der Kieselsäure in der Entwicklung höherer Pflanzen. I. Analyse des Hemmung durch Germaniumsäure. Planta 76: 25-36.
- WERNER, D. 1977. Silicate metabolism. p. 110-149. In D. WERNER (ed.) The biology of diatoms. Blackwell Sci. Pub., London.
- WERNER, D. and PETERSEN, M. 1973. Traceruntersuchungen mit ⁷¹Germanium im Silikatstoffwechsel von Diatomeen. Z. Pfl. Physiol. 70: 54-65.