

A-5 紫外線増加が植物に及ぼす影響に関する研究

(3) 紫外線増加が海藻類に及ぼす影響の評価に関する研究

研究代表者 財団法人海洋生物環境研究所 山本正之

環境庁 国立環境研究所

(委託先)

財団法人海洋生物環境研究所 実証試験場

山本正之・馬場将輔

辻 雅明

平成2-4年度合計予算額 14,053千円

〔要旨〕 海藻類には紫外線吸収物質が含まれていることが知られており、環境紫外線に対する防御に関わっていると考えられている。ここでは、数種の紅藻類の天然藻体と培養藻体を用いて、これらに含まれる紫外線吸収物質を測定した。また、環境紫外線の強度が増した場合の実態を検討するため、人工光源からのUV-B照射を伴う培養実験を実施した。紅藻類のエタノール抽出物では、通常、紫外線吸収スペクトルに2つの極大が認められ、紫外線吸収物質の存在を示していると考えられた。しかし、用いた紅藻類のうち数種では、2つの吸収極大の一方、あるいは双方を欠くものがあった。UV-B照射の影響が現れる場合、それは、成長速度の低下、細胞の脱色あるいは枯死、光合成色素の減少、紫外線吸収物質の増加のいずれか、あるいはいくつかの組み合わせで認められた。しかし、紫外線に対する紅藻類の反応には、種によって差異がみられた。これらのことから、種ごとの紫外線に対する耐性、あるいは馴応能力の差異と、紫外線吸収物質との関係を検討しなければならないと考えられた。

〔キーワード〕 海藻、UV-B、成長、光合成色素、紫外線吸収物質

1. 序

近年、成層圏オゾン層が破壊されて、オゾンによる紫外線吸収量が減少し、地表に到達する紫外線量が増加すると予測されている。この紫外線のうちでも、特に、UV-B (280~320nm) と呼ばれる波長域の紫外線量が増加し、地球規模で人体、農作物、その他の陸上動植物などに影響を与えるのではないかと、という懸念が生じている。UV-Bの農作物への影響は、十数年前から研究されており、植物の種によって反応に差があること、他の環境要因の変化によって影響度合いが異なることなどが、明らかにされてきている。

海洋においては、近年まで、入射する太陽光線に含まれる紫外線は、海洋表面のわずか数cmの水層で減衰し、海洋生物の生育環境にとって、ほとんど重要ではないと一般に信じられていたが、実際の測定から、清澄な海水では80%/m以上の紫外線が透過することが明らかにされた^{1)・11)}。

そして、南極域成層圏のオゾン濃度の低下が観測され、南氷洋の生物生産に及ぼす紫外線増加

の影響が懸念されるようになり、一次生産者の植物プランクトンや比較的低次の消費者を中心に、研究が展開されるようになった^{2), 4), 6), 13), 15), 23)}。

このほかに、亜熱帯～熱帯域では、成層圏のオゾン層が比較的薄いのに加えて、海水が栄養塩に乏しく清澄であることから、紫外線の海洋中における透過率が高く、海洋生物の生育環境として、特に、紫外線が重要であることが指摘されている²⁶⁾。このことから、底生生物中でも、熱帯のサンゴ礁域の底生生物に対する紫外線の影響については、比較的多くの研究がなされている。

たとえば、着生生物について、強い紫外線に曝され、限られた種類だけが生息しているサンゴ礁上面の浅所に、深所や陰の部分に生息する種類を移すと1日以内に死滅し、ビニール・シートで紫外線を遮るとこの死滅が起こらないことから、環境紫外線が、サンゴ礁域の着生生物の鉛直分布を制御する重要な要因となっている¹²⁾と推察されている。

海藻類については、紫外線、特にUV-Bが、その光合成に対して阻害作用を有する^{9), 15)}こと、サンゴ礁の着生生物の例と同様に、鉛直分布を制御する重要な要因となり得る²⁹⁾可能性などが指摘されている。

また、ある種のサンゴの抽出物に、320nm付近に吸光度の吸収極大を持ち、内在共生する褐虫藻に由来すると考えられる化学物質(S-320)が含まれている¹⁷⁾ことが以前から知られている。後に、3種類のmycosporine様アミノ酸、すなわち、310nmに吸収極大を持つmycosporine-Gly, 320nmに極大を持つpalythine, 332nmに極大を持つpalythanolと同定された⁷⁾この化学物質の濃度が、サンゴの生息水深に伴って低下する傾向を有する⁸⁾ことが示され、この物質の濃度の変化と紫外線環境に対する馴応との関係が議論されている。

同様に、紫外域に吸光度の吸収極大を持つ物質が、海洋の植物プランクトン^{2), 16)}や海藻類に含まれる^{10), 27), 22)}ことが知られており、生理的、生態的機能が議論されている^{20), 21), 30)}。これらの物質のうち260～280nm付近に吸収極大を有するhomarine, trigonelline³¹⁾、および320～340nm付近に吸収極大を有するpalythine, shinorine²⁶⁾、porphyra-334²⁴⁾などの構造が決定されている。

2. 研究目的

この研究は、今後予想される成層圏オゾン層の破壊に伴う紫外線増加が、海洋生物の生理、生態や海洋生態系の構造および生産力に与える影響を、正確に評価するための基礎的知見を収集することを目的としている。そのため、紫外線増加を想定した紫外線照射に対する海藻類の反応の実態把握と、その種間の差異、およびその差異に関わる種の生態的特性を中心に検討すると共に、海藻類に含まれ、紫外線防御に関係すると見られる紫外線吸収物質について、その生態的役割について考察する。

3. 研究方法

1 材料

用いた紅藻類と、生育水深、使用部位を、第1表に示した。このうち、クロノリとウップルイノリは、室内で保存培養していた糸状体から殻胞子を放出させ、これを培養して得た葉状の配偶体を用いた。他の種は、実験を開始する当日に、周辺の海岸から採集して用いた。また、同一種で、2つ以上の異なった生育水深が認められた場合は、区別して採集した。

第1表 用いた紅藻類の生育水深と部位および検討項目

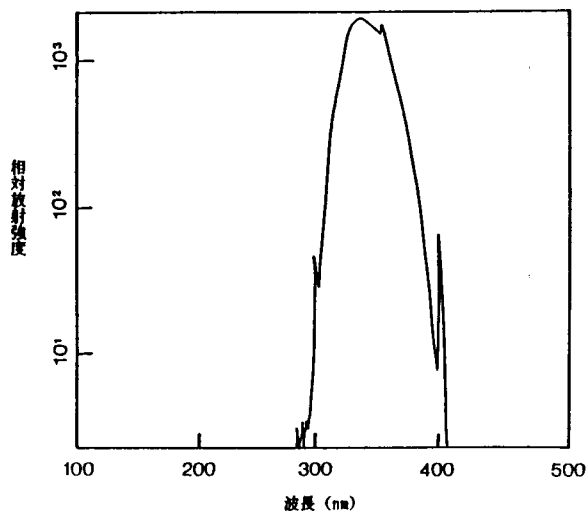
種名	生育深度	使用部位	項目
クロノリ <i>Porphyra okamurai</i>	飛沫帯	全藻体	UVAC, UVIE
ウップルイノリ <i>P. pseudolinearis</i>	飛沫帯	全藻体	UVAC, UVIE
オバクサ <i>Pterocladia capillacea</i>	0-1 m	成長点を含む枝	UVAC
ムカデノリ <i>Grateloupia filicina</i>	1 m	主軸先端部	UVAC
トサカモドキ属の一種 <i>Callophyllis</i> sp.	5 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
スギノリ <i>Gigartina tenella</i>	0-1 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
オゴノリ <i>Gracilaria asiatica</i>	0-1 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
イバラノリ属の一種 <i>Hypnea</i> sp.	0-1 m	成長点を含む枝	UVAC
ベニスナゴ <i>Schizymenia dubyi</i>	1 m	打ち抜きディスク	UVAC, UVIE
フシツナギ <i>Lomentaria catenata</i>	1-5 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
エゴノリ <i>Campylaephora hypnaeoides</i>	1 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
ハイウスバノリ <i>Acrosorium yendoi</i>	3 m	成長点を含む枝	UVAC
ウラソソ <i>Laurencia nipponica</i>	1 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
ミツデソソ <i>L. okaurae</i>	1 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE
コザネモ <i>Symphyocladia marchantiodes</i>	5 m	成長点を含む枝	UVAC, UVIE

UVAC：紫外線吸収物質の分析。UVIE：紫外線照射を伴う培養実験。

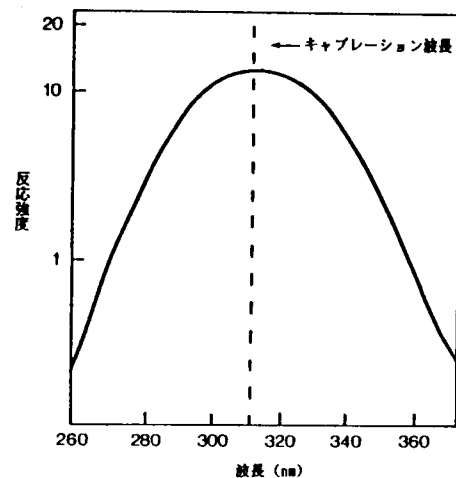
2 紫外線照射を伴う培養実験

海藻類への紫外線照射は、24時間サイクルで可視光の明暗周期を設定した恒温庫の中で、明期のみ付加的に行った。可視光の光源には白色蛍光灯を用い、紫外線の光源には第1図の波長特性を持つ紫外線照射ランプ（UVP社製TL-33型）を用いた。紫外線照射強度の測定には、第2図に示したように、310nmでキャリブレーションされた紫外線強度計（UVP社製UVX-31型）を用いた。

紫外線照射区には、500ml容または1000ml容の石英ガラス製平底フラスコを用い、これにプロバソリの栄養強化海水^{2,5)}と共に藻体を収容した。対照区の紫外線遮断区には、同形の一般ガラス製平底フラスコを用い、同様に藻体を収容した。いずれも、培養期間中は、藻体が浮遊する程度に通気攪拌した。紫外線以外の条件は、藻体を採集した環境に即して、適宜設定した。



第1図 紫外線ランプ(UVP社製TL-33型)の波長特性



第2図 紫外線強度計(UVP社製UVX-31型)の反応特性

3 紫外線吸収物質の測定

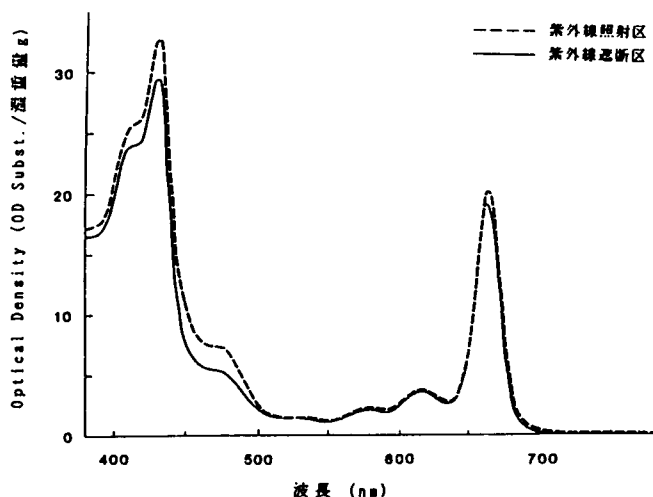
紫外線吸収物質を測定する藻体は、純水で洗浄した後、一旦、 -40°C で凍結保存した。これを、適宜解凍し、常法^{21)・22)}に従ってエタノールで抽出し、分光光度計で200~400nmの吸光スペクトルを測定した。この吸光スペクトルが極大を示す場合、その吸光度を単位藻体量当りに換算して、紫外線吸収物質含量の指標とした。

4. 実験結果

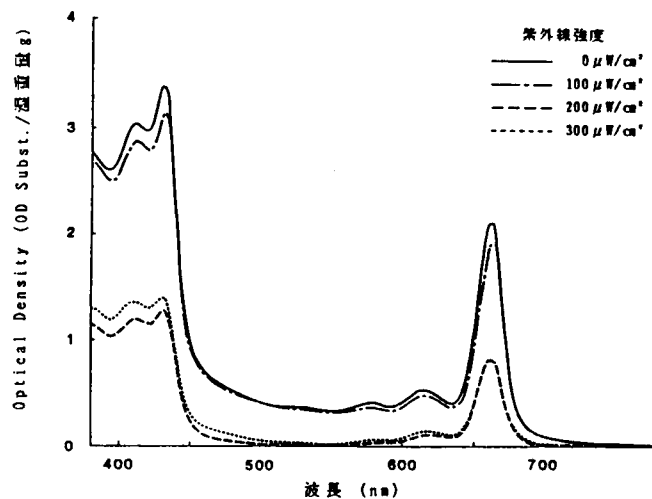
材料とした15種の紅藻類のうち、12種について、5~28日間の紫外線照射を伴う培養実験を実施した。この時の紫外線強度は、 $100\sim 300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の範囲に設定した。クロノリ、ウップルイノリなどの潮間帯から飛沫帯に生育する種では、成長速度の低下等の異常は見られなかったが、ベニスナゴ *Sc. dubyi* では細胞の脱色が、コザネモ *Sy. marchantiodes* では細胞の壊死が認められた。また、特に異常が見られなくても、成長速度が低下する傾向を示した種もあった。

光合成色素含量に由来する、アセトン抽出物の可視域の吸光スペクトルの一例を第3図に示した。このうち、660~680nm付近の極大の吸光度がクロロフィル含量の指標となる。このオバクサ *Pt. capillacea* などでは、紫外線照射による変化は特に見られなかったが、第4、5図に示したベニスナゴ *Sc. dubyi*、コザネモ *Sy. marchantiodes* などでは、紫外線照射によって、光合成色素含量が低下する傾向が見られた。

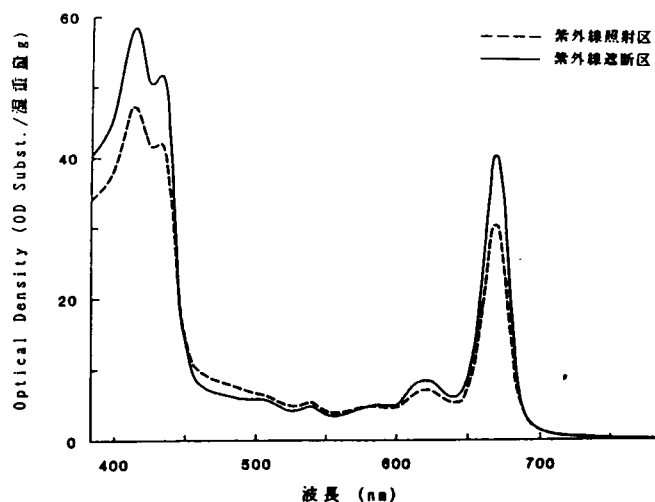
紫外線吸収物質含量を推定するために測定した、エタノール抽出物の紫外域の吸光スペクトルの一例を第6図に示した。このウラソソ *La. nipponica* のように、通常は260~280nm付近と320~340nm付近に2つの吸収極大が見られたが、第7図のエゴノリ *Cam. hypnaeoides* のように一方を欠くもの、第8図のコザネモ *Sy. marchantiodes* のように双方を欠くものも見られた。また、第9図のオゴノリ *Grac. asiatica* のように、紫外線を照射することによって、この吸収極大の吸光度が上昇し、紫外線吸収物質が増加を示す種があった。



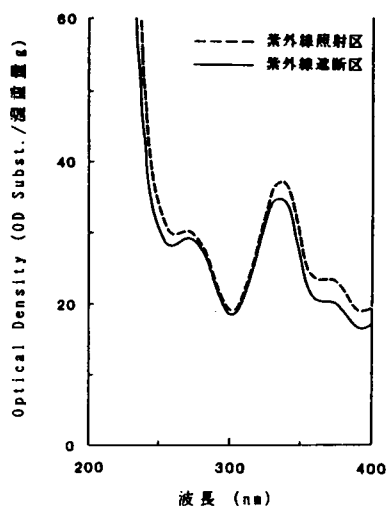
第3図 紫外線照射に伴うオバクサ *Pterocladia capillacea* の光合成色素含量の変化
紫外線 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、温度 15°C 、明暗周期12L:12D、5日目。



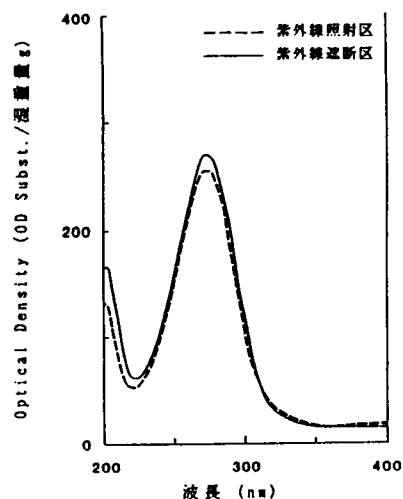
第4図 紫外線照射に伴うベニスナゴ *Schizymenia dubyi* の光合成色素含量の変化
可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，温度 15°C ，明暗周期12L：12D，5日目。



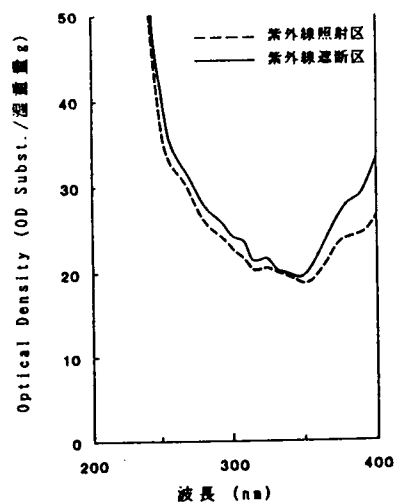
第5図 紫外線照射に伴うコザネモ *Symphyocladia marchantiodes* の光合成色素含量の変化
紫外線 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，温度 15°C ，明暗周期12L：12D，5日目。



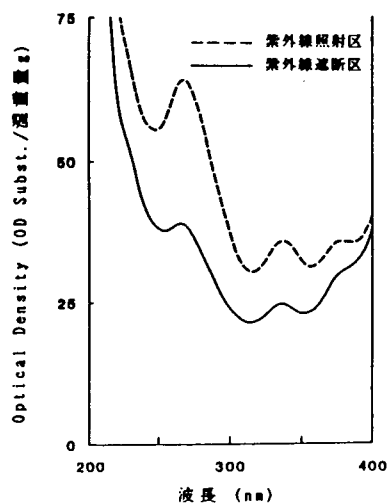
第6図 紫外線照射に伴うウラソゾ *Laurencia nipponica* の紫外線吸収物質含量の変化
紫外線 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，温度 15°C ，明暗周期12L：12D，5日目。



第7図 紫外線照射に伴うエゴノリ *Campylaeophora hypnaeoides* の紫外線吸収物質含量の変化
紫外線 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，温度 15°C ，明暗周期12L：12D，5日目。



第8図 紫外線照射に伴うコザネモ *Symphyocladia marchantiodes* の紫外線吸収物質含量の変化
紫外線 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，温度 15°C ，明暗周期12L：12D，5日目。



第9図 紫外線照射に伴うオゴノリ *Gracilaria asiatica* の紫外線吸収物質含量の変化
紫外線 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，可視光 $1400\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，温度 15°C ，明暗周期12L：12D，5日目。

5. 考察

海藻類の生育は、荒天時に波を被る飛沫帯から水深数十mまでの漸深帯に及び、種によって、それぞれ特定の生育水深帯が認められる。あるいは、階層構造を示す群落の下草として生育する種、岩盤の割れ目など陰の部分に特徴的に生育する種などが見られる。また、外海に面した清澄な海域に特徴的な種や、濁りや有機物が豊富で光透過率の低い内湾域に分布が限られる種なども見られる。このことから、それぞれの種は、その環境条件に適応しているものと考えられる。さらに、種によって、それぞれ特定の出現、繁茂季節が認められ、季節ごとの環境条件に反応して、発芽、成長、成熟、枯死しているものと考えられる。

この研究では、環境紫外線の増加を想定して、人工光源から紫外線を数種の紅藻類に照射した。そして、その影響が現れる場合、成長速度の低下、体細胞の脱色あるいは壊死、光合成色素含量の低下、紫外線吸収物質含量の増加のどれか、あるいはいくつかの組み合わせで認められた。しかし、同時に、この反応には種によって差異が存在することが示された。このうち、特に成長速度の低下や、細胞の脱色、壊死に関する反応の差異は、種による紫外線耐性の差異と考えられる。さらに、海藻類の種間に紫外線耐性の差異があるとすれば、それぞれの種の生育帯や季節性などの生態的特性と、何らかの関係があると見られる。

紫外線吸収物質に関連して、数種の紅藻類のエタノール抽出物の吸光スペクトルを測定したところ、通常、紫外線吸収物質に相当すると見られる2つの吸収極大が認められたが、種によっては、この内の一方、あるいは双方を欠くものがあつた。多くの指摘があるように、紫外線吸収物質が紫外線防御機構に関与しているとすれば、この物質の有無あるいは多寡は、その種の生態的特性と、何らかの関係があると考えられる。そこで、紫外線吸収物質を欠く種は、深所性あるいは陰所性と見られたが、必ずしもそうではなかった。このことから、海藻類の紫外線防御機構を検討する際は、紫外線吸収物質に加えて、枝の分岐様式などの外部形態、皮層の有無などの組織構造、成長点となる分裂組織の位置といった個体レベルでの形態的な属性、密生、疎生といった群落構造、階層構造内の位置などの群落レベルでの属性も、考慮する必要があると考えられた。また、種によっては、紫外線を照射することによって、細胞内の紫外線吸収物質が増加する可能性が示唆された。このことから、紫外線吸収物質含量の変化と紫外線耐性の変化の関係を明らかにし、海藻類における紫外線馴応の可能性を検討する必要があると考えられた。

6. まとめ

この研究では、3カ年にわたって、紅藻類に対する紫外線照射の影響の実態把握と、紫外線照射に対する反応の種間差の検討を中心に実施した。そして、紫外線増加を想定した紫外線照射の影響は、成長速度の低下、体細胞の脱色あるいは壊死、光合成色素含量の低下、紫外線吸収物質含量の増加のいずれか、あるいはいくつかの組み合わせで認められたが、これには種によって差異が存在することが示された。そして、紫外線吸収物質含量の変化から、種によっては、紫外線に対する耐性、あるいは馴応能力を有する可能性が示唆された。

7. 本研究より得られた成果

海藻類に対する紫外線照射の影響は、成長速度の低下、体細胞の脱色あるいは壊死、光合成色素含量の低下、紫外線吸収物質含量の上昇のいずれか、あるいはいくつかの組み合わせで認めら

れるが、種によって差異が存在すると考えられる。

海藻類の細胞は、紫外線防御機構に関与すると見られている紫外線吸収物質を含むが、種によっては、これを欠くものがあり、紫外線耐性には種による差異が存在すると考えられる。

紫外線照射によって、紫外線吸収物質含量が上昇する種があり、このような種では、紫外線増加に対する馴応能力を有する可能性が示唆される。

8. 参考文献

- 1) Baker, K.S. and R.C. Smith (1982). Spectral irradiance penetration in natural waters, pp.233-246. In : Calkins, J. (ed.), *The role of solar ultraviolet radiation in marine ecosystems*. Plenum Press.
- 2) Bidigare, R.R. (1989). Potential effects of UV-B radiation on marine organisms of the southern ocean: distributions of phytoplankton and krill during austral spring. *Photochem. Photobiol.*, 50 : 469-477.
- 3) Bothwell, M.L. and D. Sherbot (1993). Influence of natural ultraviolet radiation on lotic periphytic diatom community growth, biomass accrual, and species composition: short-term versus long-term effects. *J. Phycol.*, 29 : 24-35.
- 4) Calkins, J. (1980). The ecological significance of solar UV radiation on aquatic organisms. *Nature*, 283 : 563-566.
- 5) Cullen, J.J. and M.P. Lesser (1991). Inhibition of photosynthesis by ultraviolet radiation as a function of dose and dosage rate: results for a marine diatom. *Marine Biology*, 111 : 183-190.
- 6) Dunlap, W.C., B.E. Chalker, and J.K. Oliver (1986). Bathymetric adaptations of reef-building corals at Davies Reef, Great Barrier Reef, Australia. III. UV-B absorbing compounds. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 104 : 239-248.
- 7) Dunlap, W.C. and B.E. Chalker (1986). Identification and quantitation of near-UV absorbing compounds (S-320) in a hermatypic scleractinian. *Coral Reef*, 5 : 155-159.
- 8) Ekelund, N.G.A. (1990). Effects of UV-B radiation on growth and motility of four phytoplankton species. *Physiologia Plantarum*, 78 : 590-594.
- 9) Halldal, P. (1964). Ultraviolet action spectra of photosynthesis and photosynthetic inhibition in a green and a red alga. *Physiologia Plantarum*, 17 : 414-421.
- 10) 岩本康三・有賀祐勝 (1973). 藻類における紫外線吸収物質の分布とカワノリの特異性. *Journal of the Tokyo University of Fisheries*, 60 : 43-54.
- 11) Jerlov, N.G. (1950). Ultra-violet radiation in the sea. *Nature*, 166 : 111-112.
- 12) Jokiel, P.L. (1980). Solar ultraviolet radiation and coral reef epifauna. *Science*, 207 : 1069-1071.
- 13) Karentz, D., J.E. Cleaver, and D.L. Michell (1991). Cell survival characteristics and molecular responses of antarctic phytoplankton to ultraviolet radiation. *J. Phycol.*, 27 : 326-341.

- 14)国枝昌代・前川行幸・喜田和四郎 (1990). 紅藻の垂直分布と紫外線の関係. 日本藻類学会第14回大会講演要旨, 藻類, 38(1): 95.
- 15)Larkum,A.W.D. and W.F.Wood (1990). The effect of UV-B radiation on photosynthesis and photosystem II of phytoplanktonic and benthic algae and seagrasses, pp.385-388. In : Baltscheffsky,M. (ed.), *Current Research in Photosynthesis, Vol.II*. Kluwer Academic Publishers.
- 16)Marchant,H.J., A.T.Davidson, and G.J.Kelly (1991). UV-B protecting compounds in the marine alga *Phaeocystis pouchetii* from Antarctica. *Marine Biology*, 109 : 391-395.
- 17)Shibata,H. (1969). Pigments and a UV-absorbing substance in corals and a blue-green alga living in the great barrier reef. *Plant & Cell Physiology*, 10 : 325-335.
- 18)清水陽子・館洋・前川行幸・喜田和四郎 (1993a). 養殖スサビノリの紫外線吸収物質と生活史. 日本藻類学会第17回大会講演要旨, 藻類, 41(1): 83.
- 19)清水陽子・前川行幸・喜田和四郎 (1993b). 生育場所を異にするアマノリ属数種の紫外線吸収物質. 日本藻類学会第17回大会講演要旨, 藻類, 41(1): 83.
- 20)Sivalingam,P.M., T.Ikawa, Y.Yokohama, and K.Nishizawa (1974). Distribution of a 334 UV-absorbing-substance in algae, with special regard of its possible physiological roles. *Botanica Marina*, 17 : 23 -29.
- 21)Sivalingam,P.M., T.Ikawa, and K.Nishizawa (1976). Physiological roles of a substance 334 in algae. *Botanica Marina*, 19 : 9-21.
- 22)Sivalingam,P.M. and K.Nishizawa (1990). Ozone hole and its correlation with the characteristic UV-absorbing substance in marine algae. *Japanese Journal of Phycology*, 38 : 365-370.
- 23)Smith,R.C. and K.S.Baker (1982). Assesment of the infuluence of enhanced UV-B on marine primary productivity, pp.509-537. In : Calkins,J. (ed.), *The role of solar ultraviolet radiation in marine ecosystems*. Plenum Press.
- 24)Takano,S., A.Nakanishi, D.Uemura, and Y.Hirata (1979). Isolation and structure of a 334 nm UV-absorbing substance, porphyra-334 from the red alga *Porphyra tenera* Kjellman. *Chemistry Letters* : 419-420.
- 25)館脇正和 (1975). 海藻の培養. pp.167-172. 海洋科学別冊 5, 生物海洋学研究.
- 26)Tsujino,I., K.Yabe, and I.Sekikawa (1980). Isolation and structure of a new amino acid, shinorine from the red alga *Chondrus yendoii* Yamada et Mikami. *Botanica Marina*, 23 : 65-68.
- 27)辻野勇 (1983). 紫外線吸収物質. pp.78-89. 海藻の生化学と利用 (日本水産学会編), 水産学シリーズ, 45, 恒星社厚生閣.
- 28)Walter,C.D., B.E.Chalker, and W.M.Bandaranayake (1988). New sunscreening agents derived from tropical marine organisms of the great barrier reef, Australia. *The Proceedings of the 6th International Coral Reef Symposium* : 1-9.
- 29)Wood,W.F. (1987). Effect of solar ultra-violet radiation on the kelp *Ecklonia radiata*. *Marine Biology*, 96 : 143-150.

30) Wood, W.F. (1989). Photoadaptative responses of the tropical red alga *Eucheuma striatum* Schmitz (Gigartinales) to ultra-violet radiation. *Aquatic Botany*, 33 : 41-51.

31) 矢部和夫・辻野勇・斉藤恒行 (1965). 海藻の特殊成分の研究, 第4報カレキグサのホマリンおよびトリゴネリン. 北大水産彙報, 16 : 273-277.

[国際共同研究等の状況] 特に無し。

[研究発表の状況] 特に無し。