

海洋生物におよぼす紫外線の影響 2. 紫外線が潮間帯産海藻の 光合成および紫外線吸収物質放出に与える影響

矢部和夫¹・牧野 愛²・鈴木 稔²

¹北海道東海大学工学部海洋開発工学科(005 札幌市南区南沢5条1丁目1-1)

²北海道大学大学院地球環境科学研究科物質環境科学専攻(060 札幌市北区北10条西5丁目)

K. Yabe, M. Makino and M. Suzuki: The influence of ultraviolet irradiation on marine organisms. 2. Effect of UV-A, B irradiation on photosynthesis and secretion of UV-absorbing substance in several intertidal algae. Jpn. J. Phycol. (Sôri) 45:157-162.

Influence of UV-A, B radiation on the photosynthetic activity of 22 species of seaweeds collected from the shore of Japan Sea was studied. In 12 species the photosynthetic activity was apparently decreased by irradiation of 700 J m⁻² DUV equivalent to an average of daily amount of DUV in summer in Sapporo. From red algae UV-absorbing substances were extracted with 60% ethanol, while no such substance was found in extracts from green and brown algae. UV irradiation induced secretion of UV-absorbing substances from living samples of most red algae into seawater. These substances from red algae might defend the other organisms in coastal ecosystems from UV radiation.

Key Index Words : algae-photosynthetic activity-sunlamp- UV-absorbing substance-UV-A, B

¹Department of Marine Sciences and Technology, School of Engineering, Hokkaido Tokai University, Sapporo, Hokkaido 005 Japan.

²Division of Material Science, Graduate School of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060 Japan.

太陽からの紫外線放射中のUV-Bは成層圏オゾンの減少に伴って増加しつつあることが明にされ(竹下1994), 海洋生物に対する紫外線の影響と海洋生物が含有する紫外線吸収物質についての研究は1990年頃から盛んになされるようになったが(Carroto *et al.* 1990, Karentz *et al.* 1991), それよりかなり以前に, 紫外部320~360 nmに吸収極大を有する物質が紅藻類に含有されることを辻野・斉藤(1961)は見いだしており, さらに紅藻 *Chondrus yendoi* (エゾツノマタ)から palythine (I_{max} 320 nm), shinorine (I_{max} 330~333 nm), *Neorhodomela aculeata* (フジマツモ), *Porphyra yezoensis* (スサビノリ) から porphyra-334 (I_{max} 333-334 nm) さらに *Palmaria palmata* (ダルス)から usujirene (I_{max} 360 nm)がそれぞれ単離されている(Tsujino *et al.* 1978, 1980, 1986, Takano *et al.* 1979, 矢部ら1981)。一方サンゴおよび藍藻に含有される紫外線吸収物質は生体防御物質として機能していることが柴田(1969)によって, また *Porphyra yezoensis* (スサビノリ)に含有される紫外線吸収物質は光合成回路における物質交代を調整する機能あるいは

紫外線を光合成有効波長域の可視光に変換する機能を有することがSivalingam *et al.* (1976)によって報告されている。さらにSivalingam *et al.* (1990)は成層圏オゾンの減少に伴うと考えられる海藻の紫外線吸収物質含有量の増加が認められること, またMaegawa *et al.* (1993)は紅藻類について浅所に生育するものほど多量の紫外線吸収物質を含有することを報告している。

筆者らは太陽からの紫外線が沿岸の海藻類に与える影響について調べているが, まず人工光源を用いてホンメコンブ配偶体の成長に対する紫外線特にUV-Bの影響を調べた結果を報告した(矢部ら1996)。本研究では, 22種の海藻について紫外線照射の光合成活性に対する影響を調べた。また紅藻類では紫外線による光合成阻害の程度に相関する紫外線吸収物質の海水中への放出も認められたので併せて報告する。

材料と方法

実験材料

実験に用いた海藻は緑藻2種, 褐藻2種, および紅

Table 1 Effect of repeated irradiations of UV-A, B (350Jm-2 in 1hr.) on photosynthetic activity of seaweeds.

Algal species	Photosynthetic activity (%)	
	Accumulated UV irradiation time(hours)	
	1	2
CHLOROPHYCEAE		
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	150	150
<i>Ulva pertusa</i>	83	50
PHAEOPHYCEAE		
<i>Laminaria religiosa</i>	25	0
<i>Dictyopteris divaricata</i>	88	96
RHODOPHYCEAE		
<i>Nemalion vermiculare</i>	125	100
<i>Corallina pilulifera</i>	125	81
<i>Dumontia simplex</i>	128	157
<i>Neodilsea yendoana</i>	52	40
<i>Carpopeltis prolifera</i>	140	100
<i>Grateloupia divaricata</i>	85	69
<i>Grateloupia filicina</i>	87	121
<i>Grateloupia turuturu</i>	118	72
<i>Chondrus nipponicus</i>	44	22
<i>Chondrus ocellatus</i>	81	54
<i>Chondrus yendoi</i>	75	50
<i>Mazzaella japonica</i>	81	50
<i>Mastocarpus pacificus</i>	32	29
<i>Palmaria palmata</i>	78	67
<i>Champia parvula</i>	81	64
<i>Neorhodomela aculeata</i>	100	120
<i>Chondria crassicaulis</i>	100	137
<i>Symphocladia latiuscula</i>	75	25

藻18種となった (Table 1). それらは1994年6月, 1995年9月, 1996年6月, 7月および8月に小樽市祝津海岸で, 1995年6月および1996年5月忍路海岸で, 1996年7月に岩内盃海岸で採集し, いずれの場合も大量の海水の入ったコンテナに入れ, 1-3時間以内に実験室に持ち帰り, 10℃の恒温室において通気状態の滅菌海水中に保ち, 2-3時間以内に実験に供した。

藻体の紫外線吸収物質含量の測定

付着した海水を拭き去った新鮮な葉片0.5gを約5mlの60%エタノールとともに播漬し, 10,000rpmで20分間遠心分離した後, 上澄み液に60%エタノールを加え, 液量が試料の湿重量0.1gあたり10mlになるようにし, 200-400nm間の吸光度を日立U-3210型spectrophotometerで測定した。

紫外線照射

藻体が滅菌海水中に完全に浸る状態に保って紫外線照射を行ったが, 滅菌海水の量はいずれの場合も藻体の湿重量0.5gあたり10mlとなるようにした。光源としてはToshiba健康線ランプ(FL-20E)1本および白色蛍光灯2本を用い, こららを試料の直上20cmの位置に

Table 2 Wavelength of absorption maximum and optical density (OD) at the absorption maximum in 10 ml extract from 0.1 g wet algal sample. Since no absorption maximum was found around 320 nm in samples of green and brown algae, OD was measured at 320 nm in them.

Algal species	Absorption maxima (nm)	OD in 10ml/0.1g wet weight
CHLOROPHYCEAE		
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	—	0.196*
<i>Ulva pertusa</i>	—	0.000*
PHAEOPHYCEAE		
<i>Laminaria religiosa</i>	—	0.041*
<i>Dictyopteris divaricata</i>	—	0.180*
RHODOPHYCEAE		
<i>Nemalion vermiculare</i>	333	0.525
<i>Corallina pilulifera</i>	330	0.917
<i>Dumontia simplex</i>	334	0.375
<i>Neodilsea yendoana</i>	330	1.717
<i>Carpopeltis prolifera</i>	335	1.230
<i>Grateloupia divaricata</i>	326	1.018
<i>Grateloupia filicina</i>	330	0.757
<i>Grateloupia turuturu</i>	320	1.290
<i>Chondrus nipponicus</i>	325	0.630
<i>Chondrus ocellatus</i>	326	0.273
<i>Chondrus yendoi</i>	325	0.490
<i>Mazzaella japonica</i>	333	3.430
<i>Mastocarpus pacificus</i>	322	0.258
<i>Palmaria palmata</i>	340	0.860
<i>Champia parvula</i>	333	0.801
<i>Neorhodomela aculeata</i>	333	0.854
<i>Chondria crassicaulis</i>	327	0.529
<i>Symphocladia latiuscula</i>	330	1.832

* at 320nm.

設置して照射を行った。この条件では1時間当たりのDUV(Damaging UV)の量は約350 J m²となる。

光合成活性量の測定

差働式検容計の一種である改良型プロダクトメーター(横浜等1986)を使用し, 各々の海藻の葉片について純光合成速度および呼吸量を測定した。葉片は湿重量が0.5gになるようにそれぞれの海藻の藻体から打ち抜きあるいは切り取って, 容積約30mlの反応容器に約10mlの濾過海水とともに入れ, 約10mlの濾過海水のみを入れた対照容器とともに反応容器をプロダクトメーター本体に接続して恒温水槽内に固定し, 反応容器の下方から80 m mol m⁻² s⁻¹の白色光を照射しながら約30分間振とうして, 葉片を光馴化させた。その後, 反応容器のみをとりはずし, 濾過海水を入れ換え, 再度プロダクトメーターに接続して恒温水槽内に固定し, 80 m mol m⁻² s⁻¹の白色光を照射しながら温度平衡のための10分間の振とうを行った後, 光照射と振とうを継続したまま, 葉片から発生する酸素量の測定を3-

Table 3 Secretion of UV-absorbing substance from 0.5 g wet algal sample in 10 ml seawater induced by repeated UV-A, B irradiation (350Jm⁻² in 1hr.).

Algal species	OD at max. around 320 nm in 10ml/0.5g wet weight				Blank
	After each irradiation			12 h after	
	1st	2nd	3rd	3rd irradiation	
CHLOROPHYCEAE					
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	—	—	—	—	—
<i>Ulva pertusa</i>	—	—	—	—	—
PHAEOPHYCEAE					
<i>Laminaria religiosa</i>	—	—	—	—	—
<i>Dictyopteris divaricata</i>	—	—	—	—	—
RHODOPHYCEAE					
<i>Nemalion vermiculare</i>	—	—	—	—	—
<i>Corallina pilulifera</i>	—	—	0.043	0.603	—
<i>Dumontia simplex</i>	—	—	—	0.375	—
<i>Neodilsea yendoana</i>	0.024	0.109	0.325	1.082	—
<i>Carpopeltis prolifera</i>	—	—	0.303	1.477	—
<i>Grateloupia divaricata</i>	—	—	—	0.047	—
<i>Grateloupia filicina</i>	—	—	—	0.268	—
<i>Grateloupia turuturu</i>	—	—	—	0.119	—
<i>Chondrus nipponicus</i>	—	0.013	0.048	0.200	—
<i>Chondrus ocellatus</i>	—	0.044	0.093	0.216	—
<i>Chondrus yendoii</i>	0.239	0.410	0.505	0.956	—
<i>Mazzaella japonica</i>	—	0.403	0.931	1.620	—
<i>Mastocarpus pacificus</i>	0.036	0.168	0.258	0.245	—
<i>Palmaria palmata</i>	0.043	0.174	0.677	0.920	—
<i>Champia parvula</i>	0.018	0.399	0.779	1.243	—
<i>Neorhodomela aculeata</i>	—	—	—	—	—
<i>Chondria crassicaulis</i>	—	—	—	0.911	—
<i>Symphocladia latiuscula</i>	0.011	0.016	0.044	0.544	—

— no peak around 320 nm

5分ごとに行った。測定を20-30分間にわたって行い、その結果から求められた酸素発生速度を純光合成速度とした。

第1回目の測定終了後、葉片に1時間にわたって DUV 値約 350 J m⁻² の紫外線を照射し、その直後に第1回と同じ条件での純光合成速度の測定を行った。第2回目の測定終了後、再び上記と同様の紫外線照射を行い、その直後に第3回目の純光合成速度の測定を行った。

藻体からの紫外線吸収物質放出量の測定

0.5 g の試料を 10 ml の濾過海水に浸し、市販のポリ塩化ビニリデンシートで覆い、恒温室で 10℃ に保ちながら DUV 量にして約 350 J m⁻² となる 1 時間の紫外線照射を 1 時間の暗期をはさみながら 3 回繰り返し、各照射期の直後に試料の浸っている海水を 3 ml ずつ採取し、320 nm 付近の吸収極大における吸光度の測定を

行った。3 回目の照射終了後に濾過海水を交換し、10℃ の暗所に 12 時間置いてから、海水の吸光度測定を行った。なお同一種の試料を濾過海水に浸して 10℃ の暗所に置き、17 時間後に海水の吸光度測定を行い、得られた値をブランクとした。

結果

Table 1 は 22 種の海藻について葉片の光合成活性に対する紫外線照射の影響を調べた結果を示したものである。各試料に対する DUV 量にして約 350 J m⁻² となる 1 時間の紫外線照射を 2 回行い、照射前の純光合成速度に対する 1 回目の照射後および 2 回目の照射後の値の比を求めた。Table 1 の左欄に前者、右欄に後者を示したが、22 種中 12 種 *Ulva pertusa* (アナアオサ)、*Laminaria religiosa* (ホソメコンブ)、*Neodilsea yendoana* (アカバ)、*Grateloupia divaricata* (カタノリ)、*Chondrus nipponicus* (マルバツノマタ)、*C. ocellatus* (ツノマタ)、*C. yendoii* (エ

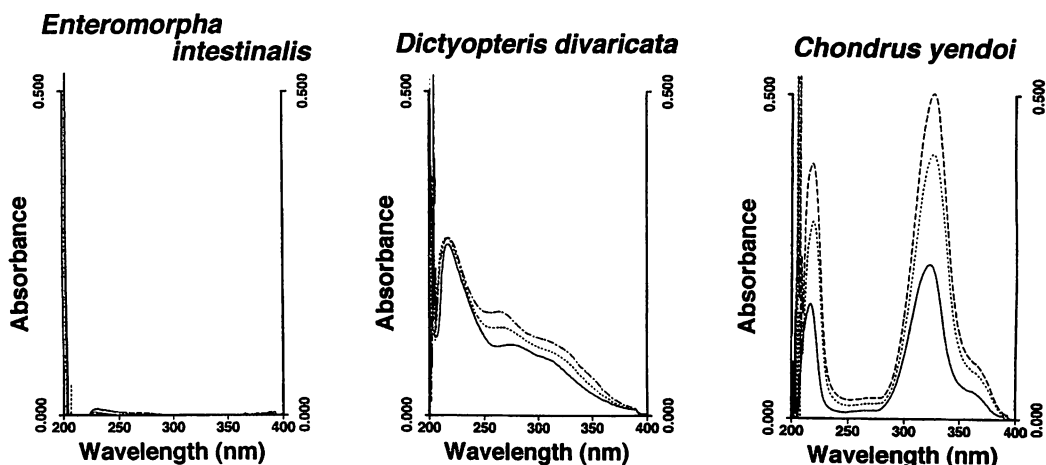


Fig. 1 UV-absorption spectra of seawater (10 ml) in which algal sample (0.5 g wet wt.) was cultured and repeatedly irradiated with UV-A, B for 1 hour (350 Jm^{-2}), 2 hour (700 Jm^{-2}), 3 hour (1050 Jm^{-2}).

ゾツノマタ), *Mazzaella japonicum* (アカバギンナンソウ), *Mastocarpus pacificus* (イボノリ), *Palmaria palmata* (ダルス), *Champia parvula* (ワツナギソウ), *Symphocladia latiuscula* (イソムラサキ)では1回目および2回目の照射がともに光合成活性を減ずるよう作用したことがわかる。その作用はとくに褐藻の*L. religiosa* (ホソメコンブ)では著しく、純光合成速度が1回目の照射で25%へと減少し、さらに2回目の照射で完全に失われた。しかし、22種中の残りの10種では紫外線照射によって光合成活性が減じたとは判定できず、それらの内数種では照射後純光合成速度が増したとみなされなければならない結果が得られた。

Table 2は22種の海藻の生藻体の60%エタノール抽出液の320 nm付近の吸収極大の波長と生藻体0.1 gあたりの液量を10 mlとした場合の吸収極大における吸光度とを示したものであるが、緑藻および褐藻のそれぞれ2種では320 nm付近に吸収極大が認められなかったため、吸光度は320 nmにおいて測定した。本研究に用いた緑藻2種および褐藻2種の抽出液には320 nm付近に明瞭な吸収極大が認められないうえ、320 nmにおける吸光度もすべて0.2以下であったのに対し、紅藻の18種ではすべて320 nm付近の吸収極大が明瞭であり、吸収極大における吸光度は、6種で約0.3-0.5とやや小であったが、他の種では1.0前後あるいはそれ以上であり *Mazzaella japonica* (アカバギンナンソウ)では3.43という高い値が得られた。

さらに22種の海藻の生藻体0.5 gを10 mlの濾過海水に浸し、10℃に保ちながら DUV 約 350 Jm^{-2} となる

1時間の紫外線照射を1時間の暗期をはさみながら3回繰り返し、各照射直後の海水および最終照射直後に交換して12時間経過後採取した海水について320 nm付近の吸収極大における吸光度を測定したが、Table 3はその結果である。緑藻と褐藻の藻体が浸った海水中には3回の紫外線照射後も紫外線吸収物質は見出せなかったが、紅藻では *Nemalion vermiculare* (ウミゾウメン)と *Neorhodomela aculeata* (フジマツモ)を除く16種で紫外線照射によって藻体の浸った海水中の紫外線吸収物質の濃度が増加したものと判断できる結果が得られた。緑藻、褐藻および紅藻の1種づつについて各照射直後採取した濾過海水の紫外線吸収スペクトルを調べた結果を Fig. 1 に示したが、紅藻の *Chondrus yendoi* (エゾツノマタ)の場合のみ、325 nmに明瞭な吸収極大が認められた。*Nemalion vermiculare* (ウミゾウメン)と *Neorhodomela aculeata* (フジマツモ)を除く16種の紅藻でも320 nm付近に明瞭な吸収極大が認められたため、本研究に用いた海藻のうち、紅藻のほとんどが紫外線の被曝によって紫外線吸収物質を分泌したとみなすことができる。

考察

近年成層圏オゾン層の減少が観測され、それに起因する紫外線特にUV-Bの生物への影響が懸念されるようになった。海域では干潮時に直接太陽光に曝される潮間帯の生物がとくに紫外線量増加の影響を受けやすいと言えるが、前報では褐藻 *L. religiosa* (ホソメコンブ)配偶体の初期発生が 0.7 KJ m^{-2} の DUV(札幌の1994

年7月における日積算DUV量の平均値)に相当する紫外線照射で約70%の阻害を受けることが明かとなり、今後のオゾン層減少が沿岸生態系に与える影響はかなり深刻なものとなる懸念される。

本研究では0.7 KJ m⁻²のDUV照射が潮間帯に生育する海藻の光合成活性に与える影響を知るため、葉片に対する350 J m⁻²のDUV照射を1時間の暗期をはさんで2回行ったが、2回の照射で緑藻2種のうち *Ulva pertusa* (アナアオサ)が50%の阻害を受け、褐藻2種のうちでは *L. religiosa* (ホソメコンブ)の光合成活性は完全に失われ、また紅藻でも18種中10種でかなりの阻害的影響を受けたため札幌の夏の平均的な日積算DUV量に相当する紫外線量の照射によって、試験した潮間帯の海藻の半数以上が光合成活性に阻害的影響を受けたと言える。

一方藻体に含まれる紫外線吸収物質は、紅藻18種すべてについて、60%メタノールで抽出され320 nm付近に吸収極大を有する物質であることが明かとなったが、緑藻と褐藻ではそのような物質は検出されなかった。また紅藻のほとんどが紫外線の被曝によって紫外線吸収物質を放出するようになることを示す結果を得た。その放出量が紫外線照射によって光合成活性に大きな阻害を受けた種でとくに多くなるという傾向がみられたため、紫外線照射による紫外線吸収物質放出と光合成阻害との間には相関関係の存在する可能性もあるが、光合成に全く阻害を受けなかった *Carpopeltis prolifera* (コメノリ)がとくに多量の紫外線吸収物質を放出したと言う結果も得られたので、今後より多くの種について実験する必要がある。

紫外線の被曝による藻体からの紫外線吸収物質の放出が生態系内に共存する他種の生物の紫外線被曝量を減ずるという効果も期待できるが、現場の海水中での紫外線吸収物質の分布や濃度に関する調査が今後の課題として残されている。

謝辞

本研究を行うに当たり、各種スペクトルの測定を行っていただきました北海道東海大学工学部生物工学科・竹内裕一教授ならびに、適切な御助言をいただいた東海大学総合科学技術研究所・佐々木政子教授に心より御礼申し上げます。

文献

Calkins, J. 1980. The ecological significance of solar UV radiation on aquatic organisms. *Nature* 283: 563-566.

Carreato, J. I. et al. 1990. Occurrence of mycosporine-like amino acids in the red-tide dinoflagellate *Alexandrium excavatum*: UV-photoprotective compounds. *Journal of Plankton Research*. 12 (5): 909-921

Japan Meteorological Agency. 1994. Annual Report on Monitoring the Ozone Layer, No. 5 Observation Results for 1993.

Japan Meteorological Agency. 1996. Annual report of ozone layer monitoring: 1995.

Karentz, D. McEuen, F. S., Land, M. C. and Dunlap, W. C. 1991. Survey of mycosporine-like amino acids compounds in Antarctic marine organisms: potential protection from ultraviolet exposure. *Marine Biology* 108: 157-166.

Maegawa, M., Kunieda, M. and Kida, W. 1993. Difference of the amount of UV-absorbing substance between shallow and deep-water red algae. *Jpn. J. Phycol.* 41: 351-354.

前川行幸 1996. 藻類の紫外線吸収物質とその応用. 月刊海洋 27: 4-9.

佐々木政子 1996. 光環境とUV. 照明学会誌 80(1): 18-23.

Shibata, K. 1969. Pigments and a UV-absorbing substance in corals and a blue-green algae living in the Great Barrie Reef. *Plant and Cell Physiol.* 10: 325-335.

Sivalingam, P. M., Ikawa, T. and Nishizawa, K. 1976. Physiological roles of substance 334 in algae. *Bot. Mar.* 16: 9-21.

Sivalingam, P. M. and Nishizawa, K. 1990. Ozone hole and its correlation with the characteristic UV-absorbing substance in marine algae. *Jpn. J. Phycol.* 38: 365-370.

Takano et al. (1979): Isolation and structure of a 334 nm UV-absorbing substance, porpyra-334 from the red alga *Porphyra tenera* Kjellman. *Chemistry Lett.* 419-420.

竹下秀・坂田俊文・佐々木政子 1994. 太陽紫外UV-B放射計の開発と諸特性の評価. *J. Illum. Engng. INST.* Jpn. 78 (10).

辻野勇・齊藤恒行 1961. 海藻の特殊成分の研究I: 紅藻に特有な紫外線吸収物質の存在について. 北大水産彙報. 12 (1): 49-58.

辻野勇 1961. 海藻の特殊成分の研究II: 紅藻特有成分の抽出及び分離. 北大水産彙報. 12 (1): 59-65.

Tsujino, I., Yabe, K., Sekikawa, I. and Hamanaka, N. 1978. Isolation and structure of a mycosporine from the red alga, *Chondrus yendoi*. *Tetrahedron Lett.* 16: 1401-1402.

Tsujino, I., Yabe, K., and Sekikawa, I. 1980. Isolation and structure of a new amino acid, shinorine, from the red alga *Chondrus yendoi*. *Bot. Mar.* 23: 65-68.

- Tsujino, I. et al. 1986. Isolation and structure of a 357 nm UV-absorbing substance, Usujirene, from the red alga *Palmaria palmata* (L) O. Kuntze. *Jap. J. Phycol.* 34: 185-188.
- 矢部和夫・関川勲・辻野勇 1981. 海藻の特殊成分の研究 XIX: フジマツモ Y 成分の誘導体. 日本水産学会講演要旨集 p209.
- 矢部和夫・関川勲・辻野勇 1987. 紅藻フクロフノリより 333-334 nm 吸収物質 shinorine の単離とその化学構造. 北海道教育大学紀要 38(1): 11-15.
- 矢部和夫・関川勲・辻野勇 1987. 海藻の特殊成分の研究 XVIII: フジマツモの Y 成分の単離とその性状. 日本水産学会春季大会講演要旨集 p251.
- 矢部和夫・牧野愛・鈴木稔 1996. 海洋生物におよぼす紫外線の影響 1. UV-B 照射によるホソメコンブの配偶体の成長阻害. 藻類 44: 139-144, (1996).
- 横浜康継・片山舒康・古谷庫造 1986. 改良型プロダクトメーター(差働式検容計)とその海藻の光合成測定への応用. *Jap. J. Phycol.* 34: 37-42.

(Received Nov. 10 1996, Accepted Oct. 3 1997)