

広島湾における水中懸濁物と 大型褐藻クロメの葉上堆積物との光吸収特性の比較

新村陽子¹⁾・梶田 淳²⁾・寺脇利信³⁾・吉田吾郎^{3,4)}・浜口昌巴^{3,4)}・井関和夫⁴⁾

¹⁾ 海洋プランニング株式会社, 〒455-0036 愛知県名古屋港区浜2-10-11

²⁾ 水圏リサーチ株式会社, 〒730-0052 広島県広島市中区千田町3-11-7

³⁾ 独立行政法人 水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所, 〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

⁴⁾ 広島大学大学院生物圏科学研究科, 〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4

要 旨 海水中の懸濁物と、海藻の葉上堆積物は、ともに藻体表面に到達する光を質的かつ量的に変化させ、海藻の生産力に多大な影響を及ぼす。本研究では内湾域である広島湾における大型褐藻クロメの葉上堆積物とクロメ群落直近の海水中の懸濁物について、両者の光吸収係数を統一的手法（QFT法）に基づいて把握し、その特性を比較した。懸濁物と堆積物の全体の光吸収特性に明瞭な差は認められず、葉上堆積物の多くが沈降した懸濁物によって構成されていたことが推察された。懸濁物・堆積物ともに、デトリタスや微細藻類など多様な要素により構成されており、光合成有効波長域（400-700nm）のうち、短波長側の光は微細藻類の色素以外のデトリタスなどが、長波長側の光は微細藻類の光合成色素が吸収し、それぞれクロメの光吸収に大きく影響すると考えられた。

キーワード：吸収係数、クロメ、懸濁物、堆積物、光、広島湾

緒 言

藻場を構成する海藻類は、沿岸域の一次生産者として極めて重要な役割を果たしている。海藻類による光合成やそれに基づいた成長は光による制限を受けやすく、懸濁物の増加など水中の光環境の悪化に大きく影響を受ける。光合成に有効な光は、一般的に400-700nmの波長領域（PAR）にあり、海藻の一次生産は、その生育する海底に到達する光のスペクトル分布およびスペクトルごとの量に依存する（Morel 1991）。

海水中に入射した太陽光は、水深が深くなるに伴い、吸収・散乱によって指数関数的に減衰する（カーク 2002）。この入射光の減衰は海域や波長によって異なり、例えば、生物生産が活発な沿岸域において、青色光は表層でCDOM（有色溶解有機物）や植物プランクトンによって吸収されるため、深層まで届きにくい（Hoge *et al.* 1993）。海洋の光吸収に対する海水、CDOM、植物プランクトンおよびデトリタスなどの影響については、特に沿岸域の海色リモートセンシングの分野で関心が持たれており、これらの光吸収特性について多くの既往研究がある（例：平澤ら 2001；Kishino *et al.*, 1985；Ohi *et al.*, 2005）。特に、植物プランクトンやデトリタス等の懸濁物は、それぞれの特性に応じて光を吸収し、その量に応じて海底に到達する光を質・量的に変化させ、藻場の一次生産にも多大な影響を与えていると考えられるが、そのような観点からなされた研究は極めて少ない（例：Anastasiou 2009）。

一方、海藻や海草の葉上では一般的に「浮泥」と呼称されることの多い粘土鉱物を核とする有機物も含む集合体の堆積がしばしば観察される。また、これら葉上の堆積物は微細藻類の着生基質となることも報告されており、葉上堆積物は、鉱物、デトリタスなど生物由来の有機物、および微細藻類の生細胞など、多様な

2) 懸濁物と堆積物の各波長の吸光度および光吸収係数

懸濁物や堆積物の吸光度 ($OD(\lambda)$) はフィルター上の捕集量に依存し、堆積物において高かった (Fig. 1)。懸濁物・堆積物共に CHL a による吸収極大がそれぞれ赤色光領域の676nm、青色光領域の440nm 付近に認められる点で両者は共通していた。水中懸濁物と葉上堆積物の400-700nm の光吸収係数 $a_p(\lambda) \cdot a_m(\lambda) \cdot a_{ph}(\lambda)$ を、それぞれ Fig. 2, 3に示す。そのうち440, 500, 676nm の光吸収係数を Table 1に示した。その結果、堆積物・懸濁物ともに植物色素を除いた光吸収 $a_m(\lambda)$ は短波長側の440nm, 500nm において、微細藻類の光

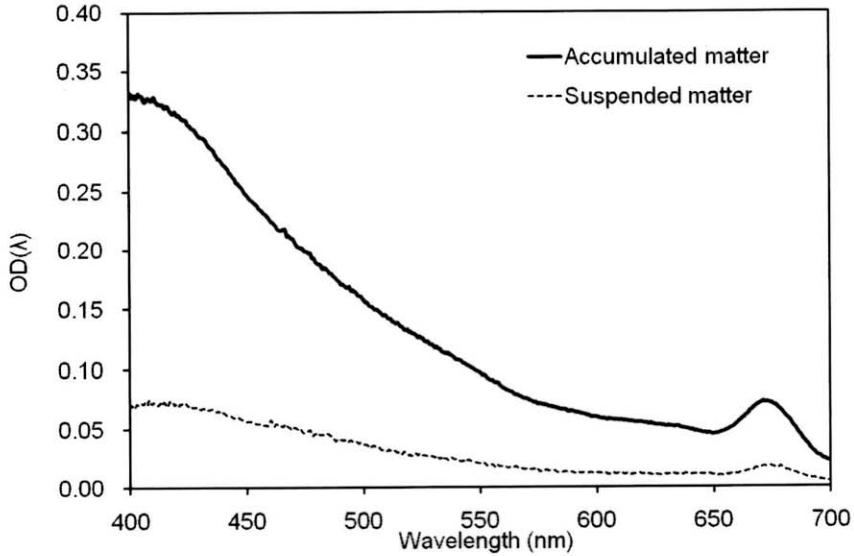


Fig. 1. Optical density ($OD(\lambda)$) of suspended matter in the vicinity of *Ecklonia* bed and accumulated matter on the thalli of *Ecklonia kurome*.

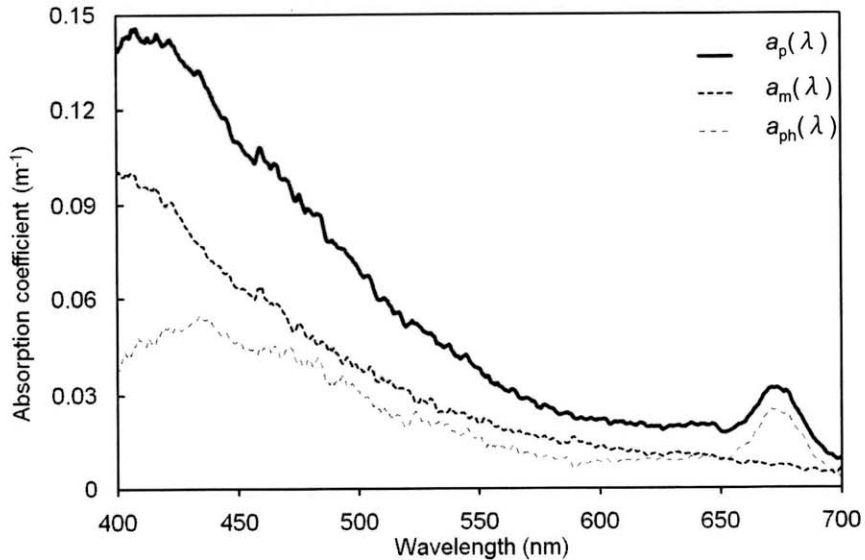


Fig. 2. Spectral values of the absorption coefficient for total particulate (a_p), non-algal particles (a_m), and microalgae (a_{ph}) at the water sample in the vicinity of *Ecklonia* bed.

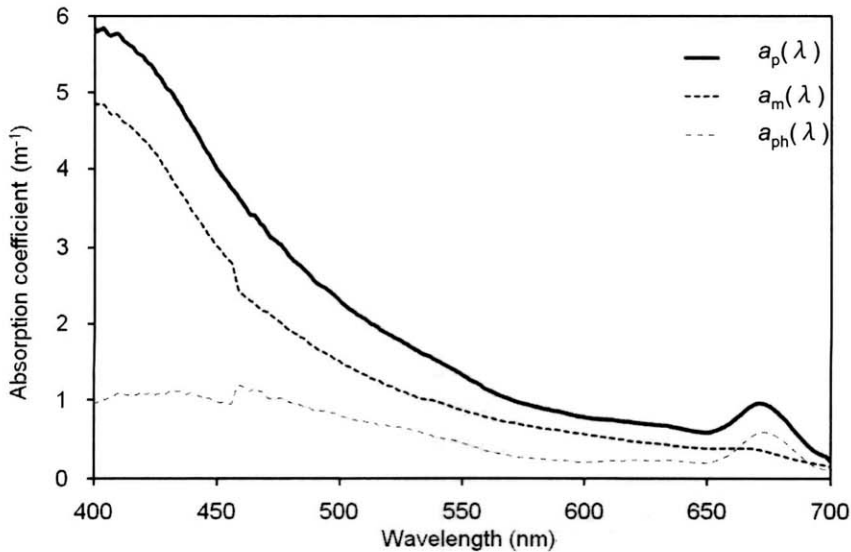


Fig. 3. Spectral values of the absorption coefficient for total particulate (a_p), non-algal particles (a_m), and microalgae (a_{ph}) of accumulated matter on the thalli of *Ecklonia kurome*.

Table 1. The spectral values of absorption coefficient (m^{-1}) for the accumulated matter on thalli of *Ecklonia kurome* and the suspended matter in the water in the vicinity of *Ecklonia* bed.

Wavelength	Sediment			Seawater		
	a_p	a_m	a_{ph}	a_p	a_m	a_{ph}
440nm	4.57	3.57	1.17	0.136	0.073	0.062
500nm	2.31	1.54	0.86	0.076	0.038	0.037
676nm	0.92	0.34	0.60	0.033	0.008	0.026

合成色素による光吸収 $a_{ph}(\lambda)$ は長波長側の676nmにおいてそれぞれ大きかった。したがって、広島湾の大型褐藻クロメの葉上堆積物とクロメ群落直近の海水中の懸濁物によるクロメの光吸収を阻害する原因物質はスペクトルによって異なる。

藻場が成立するような内湾において、青色光は海面の表層で CDOM や植物プランクトンによって吸収されるために深所まで届かず、一般的な制限要因となる (Hoge *et al.*, 1993)。そのような環境下で生育するクロメなどの褐藻類による光吸収のピークは、CHL a やキサントフィルカロチノイドによる440nm, 500-570nm, 675nm 付近に認められる (例: カーク 2002)。クロメなど大型褐藻類はカロチノイドなどの補助色素によって広い範囲の光を取り込むことによって (カーク 2002; Malick 2004), 青色光が制限された環境下に適応しているとされる。

堆積物や懸濁物の量が葉上または水柱において増加すると、葉に到達する光量子量は減衰する (例: Brush and Nixon, 2002; 玉置ら1999)。さらに堆積物や懸濁物中に、珪藻類等の微細藻類が増加すれば、褐藻類と類似した吸収スペクトルを持つ為に、減衰した光の中で光競合が起こり、クロメの生産力が低下すると考えられる。

3) 懸濁物と堆積物の光吸収特性

懸濁物と堆積物の各吸収係数から B/R 比と B/G 比を求め、それを Table 2 に示した。その結果、懸濁物と堆積物における吸収係数の B/G 比、B/R 比は概ねよく似た値を示しており、クロメ場近傍の懸濁物と堆積

Table 2. B / G and B / R ratio of the spectral values of absorption coefficient (m^{-1}) for the accumulated matter on thalli of *Ecklonia kurome* and the suspended matter in the water in the vicinity of *Ecklonia* bed.

	Sediment			Suspended materials		
	a_p	a_m	a_{ph}	a_p	a_m	a_{ph}
B / G ratio	1.98	2.32	1.36	1.79	1.92	1.68
B / R ratio	4.97	10.50	1.95	4.12	9.13	2.38

Table 3. The spectral values of chl a specific absorption coefficient ($m^2 mg CHLa^{-1}$) for the accumulated matter on thalli of *Ecklonia kurome* and the suspended matter in the water in the vicinity of *Ecklonia* bed.

Wavelength	Sediment	Suspended materials
$a^*(440)$	0.017 ± 0.006	0.043
$a^*(676)$	0.010 ± 0.002	0.017
B / R ratio	1.82	2.54

物がほぼ同質のものであることが示唆された。すなわち、クロメの葉上堆積物の多くが沈降した懸濁物によって構成されていたと推察された。

分光光度計から推定された $a_{ph}(\lambda)$ の400-700nm までの平均値を求め、蛍光光度計で測定した CHLa 濃度で割ると微細藻類の単位 CHLa あたりの比吸収係数 a^* を算出できるが、これで藻類の単位光合成色素量あたりの光吸収効率を比較することができる。懸濁物と堆積物の比吸収係数 a^* を求めた結果、懸濁物では $0.020 m^2[mgCHLa]^{-1}$ 、堆積物では $0.008 \sim 0.013 m^2[mgCHLa]^{-1}$ と後者でほぼ半減した。したがって、懸濁物に比べて堆積物において藻類の単位色素量あたりの光吸収効率が低いことが明らかとなった (Duysens, 1956)。さらに、比吸収係数 a^*_{ph} を CHLa の吸収ピークの波長440, 676nm で比較した結果、懸濁物の $a^*_{ph}(440)$ および $a^*_{ph}(676)$ は、それぞれ0.043, $0.017 m^2[mgCHLa]^{-1}$ であり、外洋などにおける $a^*(\lambda)$ 値 (例: Babin *et al.*, 1993; Ohi *et al.*, 2005) と明瞭な差は認められなかった。一方、堆積物の $a^*_{ph}(440)$ および $a^*_{ph}(676)$ は、それぞれ 0.017 ± 0.006 , $0.010 \pm 0.002 m^2[mgCHLa]^{-1}$ と、懸濁物に比べて明らかに低かった (Table 3)。この微細藻類の比吸収係数 a^*_{ph} の差は、藻類がデトリタスや無機物と共に凝集して存在している堆積物中においては特に微細藻類の細胞外での光吸収が大きく、海水中に懸濁した状態に比べて「パッケージ効果」の影響が著しいために光吸収効率が低下し、生じたと考えられた (Kirk, 1975; Morel and Bricaud, 1981)。また、CHLa の吸収ピークにおける懸濁物と堆積物の $a^*_{ph}(\lambda)$ の B / R 比はそれぞれ2.54, 1.82となり、懸濁物と堆積物の $a_{ph}(\lambda)$ の B / R 比と同じ傾向を示し、微細藻類の比吸収係数 a^*_{ph} の特性は吸収係数 a_{ph} に反映された。

さらに今後は、クロメの生育に及ぼす影響の解明に資する上で、葉上堆積物による藻体への光吸収の影響を明らかにし、海藻群落が成立する各水深帯における波長組成と現場の海藻類による光吸収特性を把握する必要がある。また、褐藻類はカロチノイドの効率よい光吸収に依存しているため (カーク, 2002)、その光吸収に対する堆積物の「質」すなわち組成の変化に伴う吸収の変化を調べる必要があるだろう。今回は、サイドオン型の分光光度計を用いたが、測定ノイズを少なくするためにはエンドオン型・積分球型を用いることが望ましいとされる (平澤ら 2001)。本研究では粒状物による光吸収のみを扱い溶存物質、特に CDOM による光吸収を無視したが、溶存物質による吸収係数 $a_{dwm}(\lambda)$ は400-700nm の波長帯において、 $a(\lambda)$ の20%以上を占めることが報告されているため (Sasaki *et al.* 2001)、今後これにも焦点を当てていく必要がある。

謝 辞

機器類の使用に際し、快く便宜を図ってくださった独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所 環境動態研究室の榎谷賢治室長および化学環境部の藤井一則室長をはじめ、ご協力くださった研究所関係者の皆様に深く感謝申し上げます。また、本稿作成にご理解くださった海洋プランニング(株)の同僚諸氏に謝意を表します。

引用文献

- Anastasiou, C. J. 2009. Characterization of the underwater light environment and its relevance to seagrass recovery and sustainability in Tampa Bay, Florida. p.132 (Ph.D. dissertation).
- Babin M., Morel, A., Gagnon, R., 1993. Extent of variations in the specific absorption coefficient for natural phytoplankton assemblages: Impact on estimation of primary production. *Limnol. Oceanogr.*, **38**: 154-177.
- Brush, M. J., Nixon, S. W. 2002. Direct measurements of light attenuation by epiphytes on eelgrass *Zostera marina*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **238**: 73-79.
- Cleveland, J. S., Weidemann, A. D., 1993. Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass-fiber filters. *Limnol. Oceanogr.*, **38**: 1321-1327.
- Dupouy, C., Loisel H., Neveux, J., Brown, S. L., Moulin, C., Blanchot, J., Le Bouteiller, A., Landry, M. R., 2003. Microbial absorption and backscattering coefficients from in situ and POLDER satellite data during an El Niño-Southern Oscillation cold phase in the equatorial Pacific (180°). *Journal of Geophysical Research.*, **108(C12)**, 8138, doi:10.1029/2001JC001298.
- Duysens, L. N. M. 1956. The flattening of the absorption spectrum of suspensions as compared to that of solutions. *Biochem. Biophys. Acta*, **19**: 1-12.
- 平澤亨・鈴木光次・岸野元彰・古谷研・田口哲・齋藤誠一・才野敏郎・松本和彦・播本孝史・佐々木宏明・藤木徹一・古原慎一・柏俊行. 2001. QFT法および現場型水中分光吸光度計による植物プランクトンの光吸収スペクトル測定プロトコル, *海の研究*, **10**: 471-484.
- Hoge, F. E., Vodacek, A., Blough, N. V., 1993. Inherent optical properties of the ocean: Retrieval of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from fluorescence measurements. *Limnol. Oceanogr.*, **38**: 1394-1402.
- Holm-Hansen, O. C., Lorenzen, C. J., Holmes, R. W. Strickland, D. H., 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. du Council.*, **30**: 3-15.
- 川崎保夫・山田貞夫. 1991. 海中砂漠緑化技術の開発 第5報 アラメ, カジメ, クロメの配偶体および幼胞子体に対する成長限界光量と堆積物堆積量. *電力中央研究所報告 U91034*: 1-22.
- Kirk, J. T. O. 1975. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to attenuation of light within waters, II, Spherical cells. *New Phytol.*, **75**: 21-36.
- カーク, J. T. O., 2002. 水圏の生物生産と光合成. (山本民治 訳), 恒星社厚生閣, 東京 pp387.
- Kishino, M., Takahashi, M., Okami, N., Ichimura, S., 1985. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Science*, **37**: 634-642.
- Malick, L. A., 2004. Light quality and phytoplankton viability. University of South Florida.
- Mitchell, B. G., Bricaud, A., Carder, K., Cleveland, J., Ferrari, G., Coull, R., Kahru, M., Kishino, M., Maske, H., Moisan, T., Moore, L., Nelson, N., Phinney, D., Reynolds, R., Sosik, H., Stramski, D., Tassan, S., Trees, C., Weidemann, A., Wieland, J., Vodacek, A., 2000. Chapter 12: Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. In "Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, Revision 2", Ed. Fargion and Mueller, Goddard Space Flight Space Center, Maryland. 125-153.
- Morel, A., 1991. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological

- implications. *Prog. Oceanogr.*, **26**: 263-306.
- Morel, A., Bricaud, A., 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.*, **28**: 1375-1393.
- Mukai, H., Iijima, A., 1995. Grazing effect of a gammaridean Amphipoda, *Ampithoe* sp., on the seagrass, *Syringodium isoetifolium*, and epiphytes in a tropical Seagrass bed of Fiji. *Ecol. Res.*, **10**: 243-257.
- 新村陽子・内村真之・薄浩則・吉川浩二・吉田吾郎・玉置仁・寺脇利信. 2003. 広島湾の藻場の外縁部における水環境と光透過. *水産工学*, **40**: 7-14.
- 新村陽子・玉置仁・吉田吾郎・寺脇利信. 2003. アマモ類の葉上堆積物における付着珪藻類の役割. *日本藻類学会第27回大会要旨集*, 100
- 新村陽子・吉田吾郎・玉置仁・寺脇利信. 2004. 広島湾に生育する大型褐藻群落の内部における光環境の違い. *水産工学*, **41**: 133-138.
- Niimura, Y., Tamaki, H., Yoshida, G., Terawaki, T., Iseki, K., 2009. Variation in biomass and species composition of epiphytic community on the different aged leaves of *Zostera marina* (Chlorophyta). *J. Grad. Sch. Biosp. Sci., Hiroshima Univ.*, **48**: 55-61.
- Ohi, N., Saito, H., Taguchi, S., 2005. Diel patterns in chlorophyll a specific absorption coefficient and absorption efficiency factor of picoplankton. *J. Oceanogr.*, **61**: 379-388.
- Sasaki, H., Saitoh, H., Kishino, M., 2001. Bio-optical properties of seawater in the western subarctic gyre and Alaskan Gyre in the subarctic North Pacific and the Southern Bering Sea during the Summer of 1997. *J. Oceanogr.*, **57**: 275-284.
- Sosik, H. M., 1999. Storage of marine particulate samples for light-absorption measurements. *Limnol. Oceanogr.*, **44**: 1131-1141.
- Sosik, H. M., Mitchell, B. G., 1995. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System. *Deep-Sea Research I*, **42**: 1717-1748.
- Suzuki, R., Ishimaru, T., 1990. An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-Dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, **46**: 190-194.
- Taguchi, S., Laws, E. A., 1988. On the microparticles which pass through glass fiber filter type GF/F in coastal and open waters. *J. Plankton Res.*, **10**: 999-1008.
- 玉置仁・西嶋渉・新井省吾・寺脇利信・岡田光正. 1999. アマモ生育に及ぼす葉上堆積物の影響. *水環境学会誌*, **22**: 663-667.
- 寺脇利信・後藤弘・本多正樹. 1991. 海中林造成技術の実証 第1報 技術動向の文献・事例調査. *電力中央研究所・調査報告*: **U91021**: pp. 38.
- Terawaki, T., Hasegawa, H., Arai, S., Ohno, M., 2001. Management-free techniques for restoration of *Eisenia* and *Ecklonia* beds along the central Pacific coast of Japan. *J. Appl. Phyc.*, **13**: 13-17.
- 寺脇利信・吉川浩二・吉田吾郎・内村真之・新井章吾. 2001. 広島湾における大型海藻類の水平・垂直分布様式. *瀬戸内海区水産研究所報告*, **3**: 73-81.

Comparison of absorption coefficients between accumulated matter on the thalli of *Ecklonia kurome* and suspended matter in the water surrounding *Ecklonia* bed

Yoko NIIMURA¹, Atsushi KAJITA², Toshinobu TERAWAKI³, Goro YOSHIDA^{3,4},
Masami HAMAGUCHI^{3,4} and Kazuo ISEKI⁴

1) Oceanic Planning Corporation, 2-10-11 Hama, Minato, Nagoya, Aichi 455-0036, JAPAN

2) Aquatic Research Inc., Senda, 3-11-7, Naka, Hiroshima 730-0052, JAPAN

3) National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea,
2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, JAPAN

4) Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University,
1-4-4 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8528, JAPAN

Abstract Light is the primary limiting factor for macroalgal production. Understanding not only the quantity but also the quality of light reaching algal thalli is important to the success of algal recovery and sustainability. This study explores the optical properties of accumulated matter on the thalli of *Ecklonia kurome* and suspended matter in the water surrounding an *Ecklonia* bed in Hiroshima Bay, based on spectral absorption coefficient estimated by the quantitative filter technique (QFT) method.

According to the experiments, minimal difference of optical properties between suspended matter and accumulated matter was recognized. It is assumed that suspended matter in the water formed the accumulated matter on the thalli of *E. kurome*. Both suspended matter and accumulated matter were composed of multiple components, various kinds of microalgae, detritus and inorganic matter. In the wavelength-specific photosynthetically active radiation (400-700nm), detritus and inorganic matter formed the primary absorber of blue light, while microalgal pigments was the primary absorber of red light. Each absorber in suspended and accumulated matter might attenuate specific wavelength and change the quality of light reaching the thalli of *E. kurome*.

Keywords: absorption coefficients, accumulated matter, *Ecklonia kurome*, Hiroshima Bay, light, suspended matter