

連続観測記録を用いた大阪湾奥の光環境に関する一考察

The Optical Environment under the Sea in the Head of Osaka Bay Based on a Long-term Field Observation

藤原隆一¹

Ryuichi FUJIWARA

An optical environment under the sea is important for designing environmental restoration. Irradiance under the sea is affected by SS(Suspended Substance) which is variable spatially and temporally, so it is not so easy to understand the optical environment. Therefore, it is important to investigate actual phenomena in the field. This study describes a decay of incident rays of sunlight with water depth based on the observation in the head of Osaka Bay. The decay of incident rays defined as the absorption coefficient, k , was considered. In the result, monthly averaged value of k was between 0.94m^{-1} and 1.15m^{-1} in the summer and between 0.46m^{-1} and 0.59m^{-1} in the winter. Moreover, a compensation depth or a compensation point based on k was examined and it suggested that the photon flux density was insufficient for seaweed (or seagrass) on the sea bottom in the head of Osaka Bay.

1. はじめに

海と陸の接点となる沿岸域は、古来多目的・多機能に利用され、わが国の産業、経済活動の拠点として、また生活空間としても重要な位置を占めてきた。その結果、沿岸域では干拓や埋立に伴い、多くの浅場や干潟が消失した。それに伴い、閉鎖性の高い内湾域では赤潮が頻発し、また三大湾では近年青潮が発生するなど社会問題となった。一方、消滅した干潟を人工的に造成する取り組みも行われてきている（例えば磯部，1994；環境庁，1997）。その場合、工学的な安定性はもちろんのこと、生物が長期的に生息できる環境を作ることが重要である。

生物生息に関しては、食物連鎖の出発点となる一次生産者は植物（プランクトン，海藻，海草）である。植物の光合成に光環境は不可欠であるが、水中に入った光は散乱し減衰する。一般に光合成可能な層は生産層と呼ばれており、その層厚は海水中の懸濁物質の影響を受けて変化する。内湾域では、赤潮、河川からの濁水流入、また工事や船舶による海底付近の攪乱など懸濁物質に影響する要因が多く、しかもこれらは時空間的に変動する。このような海域で干潟や浅場を新たに造成する場合、海中の光環境の重要度は高くなると考えられる。

本研究では、大阪湾最奥部で4年間にわたり実施してきた光子束密度の観測結果から海中における光の減衰状況を検討・考察し、汚濁の進んだ海域における光環境の実態を明らかにする。

2. 観測方法

観測は、図-1に示す大阪湾最奥部付近に位置する自社岸壁を利用して実施した。計測は光子束密度、水温、

DOおよび水深について行い、各計測機器は図-2のように吊り下げロープを用いて所定の高さに配置した。吊り下げロープは岸壁上の固定金具に緊結し、シンカーによ

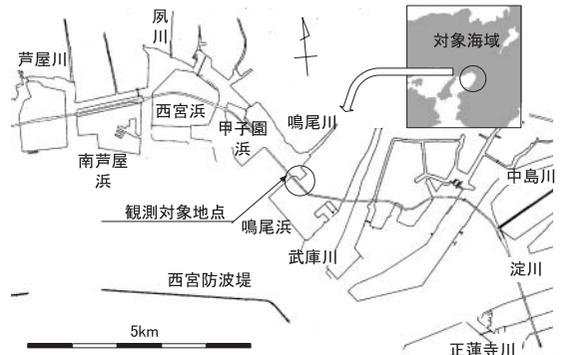


図-1 観測地点

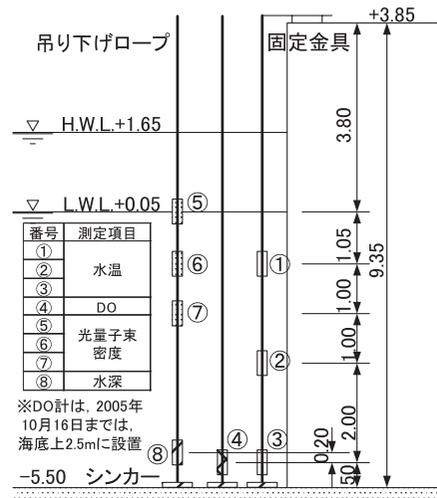


図-2 計測機器の配置

1 正会員 博(工) 東洋建設(株)総合技術研究所鳴尾研究所副所長兼水域環境研究室長

って緊張を保つようにした。光量子束密度の測定高はL.W.L.と同じD.L.+0.05mと常時水面下となるD.L.-1.0mおよびD.L.-2.0mの3点とした。

観測期間は2005年7月12日から2009年3月31日までの約3年半であり、夏季を4回含む。測定は正時から10分間隔で行い、測定値は内蔵の小型メモリに記録し、定期的に回収した。計測機器はいずれもJFEアレック社製で、光量子束密度、水温および水深の測定にはMDS-MkVシリーズ、またDOの測定にはCOMPACT DOWを用いた。なお、光量子束密度の測定に関しては、3月中旬から9月までは2-3日に1回、それ以外の期間では7日に1回の割合で受光部分を清掃した。

3. 吸光係数の算出方法

海中の光強度は海中の濁り具合に影響される。海中の濁り具合を評価する指標としては、透明度、濁度、SS、プランクトン細胞数、クロロフィルa量および吸光係数(あるいは消散係数)などがある。本研究では、水産関係でよく用いられている海中における光の透過しやすさの指標である吸光係数kを用い、光環境を検討することとした。kは水深ごとの相対光強度Zを定める係数で、これらの関係はBeer-Lambertの法則から導かれる式(1)で近似することができる(例えば、能登谷 編著, 2003)。

$$Z = I_D / I_0 = e^{-kD} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、Dは水深(m)、I₀およびI_Dはそれぞれ海面および水深Dにおける光量子束密度(μmol/m²/s)を示す。このように定義したときのkはm⁻¹の次元を持つ。

式(1)に観測で得られた3点の光量子束密度I_Dおよびそれぞれの水深Dを代入し、最小自乗法によってI₀およびkを算出した。なお、測点が2点の場合はI₀およびkは一意的に決定できる。すなわち2点の組み合わせに対応するDおよびI_Dの組み合わせを(D1, I_{D1})および(D2, I_{D2})とすると、I₀およびkは式(2)および式(3)より算出できる。

$$I_0 = 10^B \dots\dots\dots(2)$$

$$k = A \ln 10 \dots\dots\dots(3)$$

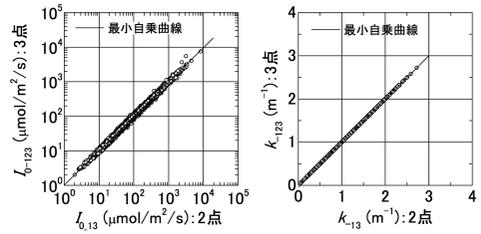
ここに、A = (log₁₀I_{D1} - log₁₀I_{D2}) / (D1 - D2) および B = log₁₀I_{D1} - A · D1 である。

4. 観測結果

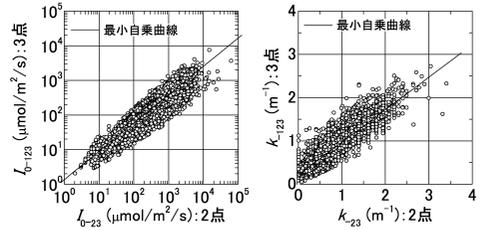
(1) 吸光係数kおよび海面における光量子束密度I₀の推定値

a) 測点数の違いによる推定値の比較

観測期間中、潮位がL.W.L.より低下するなどトラブルにより2点のデータとなった場合、式(2)および式(3)



(a) 2点をD.L.-0.05mおよびD.L.-2.0mとした場合



(b) 2点をD.L.-1.0mおよびD.L.-2.0mとした場合

図-3 推定値の比較例(2006年)

を用いてI₀およびkを算出できるが、3点の場合と比べて推定精度が低下することが懸念された。そこで3点のデータがある場合のケースを用い、その中の2点を用いた推定値と3点のそれを比較し、推定精度を調べた。図-3には、2006年度を例として計測器間の距離が最大および最小となる組み合わせの場合が示されている。I₀およびkともに3点による推定値および2点のその相関は高いが、測点距離が小さくなるとばらつきが大きくなり、2点による推定値は3点のそれより過大となることが分かった。以上より、2点のデータを用いて推定する場合、3点の推定値との関係を示す最小自乗曲線を用いることで精度よく補正できると考えられた。

表-1は、図-3に示された最小自乗曲線(線形近似)の

表-1 測定点が2点の場合の最小自乗曲線の係数(全期間の平均値)

(a) I ₀			
	I	II	III
a	0.004	0.076	0.202
b	0.996	0.956	0.787
R (相関係数)	0.998	0.976	0.921
σ (標準偏差)	0.024	0.093	0.167
(b) k			
	I	II	III
a	0.001	0.142	0.206
b	1.000	0.775	0.751
R (相関係数)	1.000	0.874	0.871
σ (標準偏差)	0.002	0.147	0.151

注) I : D.L.+0.05mとD.L.-2.0mのデータ
 II : D.L.+0.05mとD.L.-1.0mのデータ
 III : D.L.-1.0mとD.L.-2.0mのデータ

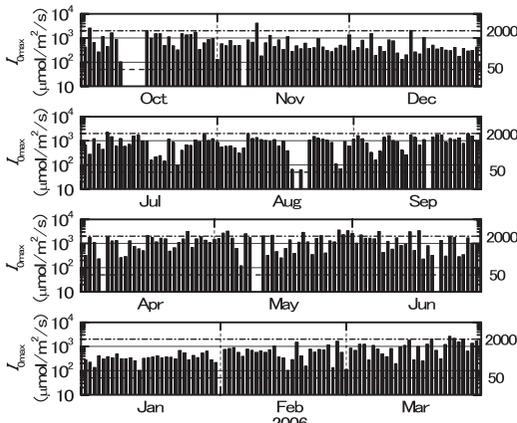


図-4 2006年における I_0 の日最大値

係数 a (切片), b (勾配) について, 全期間の平均値を表した結果である.

各ケースの相関係数は0.871から1.000であり, 相関は高いと言える. 実際に補正を行う場合は, 各年の平均値を用いて, 推定精度の向上を図った.

b) 海面における光量子束密度の推定値 I_0 の妥当性

光量子束密度は, 真夏の直射日光に対しては約2000 μ mol/ m^2/s , また曇り空では雲量によるのが約50 μ mol/ m^2/s であることが知られている. 海面の光量子束密度 I_0 の日最大値とこれらの値を比較することで推定精度を検証した. 図-4は, 2006年度における I_0 の日最大値 I_{0max} を例として示したものである. 図中には, 参考のため2000 μ mol/ m^2/s および50 μ mol/ m^2/s の値をそれぞれ1点鎖線および破線を表示した. 8月12日から8月20日の期間は清掃を行うことができなかつたため, 受光部の汚濁が進み, 8月17日から8月20日にかけて出力が低下した. この期間や欠測期間を除くと, 推定値はほぼ50 μ mol/ m^2/s から2000 μ mol/ m^2/s の範囲に分布しており, 3月から10月の期間における I_{0max} は最大で約2000 μ mol/ m^2/s となっている. また1月, 2月, 11月および12月の I_{0max} は, 3月から10月の期間に比べて小さくなる傾向が見取れる. 以上のことから, I_0 の推定値は妥当と考えられた. なお, 受光部の汚濁は測定精度を低下させる. 清掃の頻度は海域によって異なると考えられるが, 汚濁の進んだ海域では今回の頻度, すなわち3月中旬から9月までは2-3日に1回, それ以外の期間では7日に1回程度が目安になる.

(2) 吸光係数 k の経時変化

図-5および図-6は, 前図と同じ2006年における吸光係数 k および表層付近D.L.-1.0mにおける水温 T の10分ごとの経時変化を表している. これらの図から, k の大きさおよび変化は表層付近の水温変化, すなわち季節変化に応じて年間で変動している様子が見取れる. また, 冬

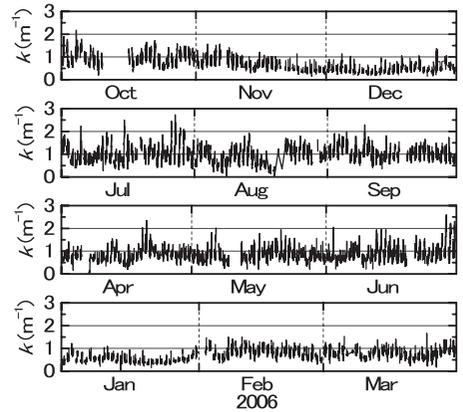


図-5 2006年における k の時間変化

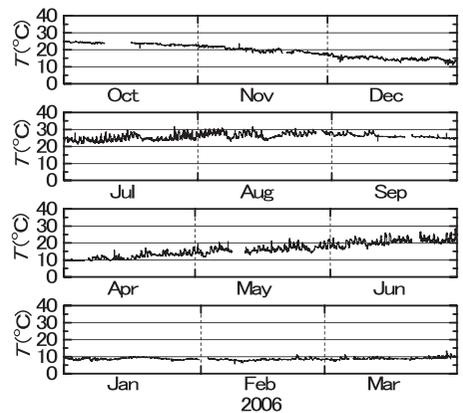


図-6 2006年における表層の水温変化 (D.L.-1.0m)

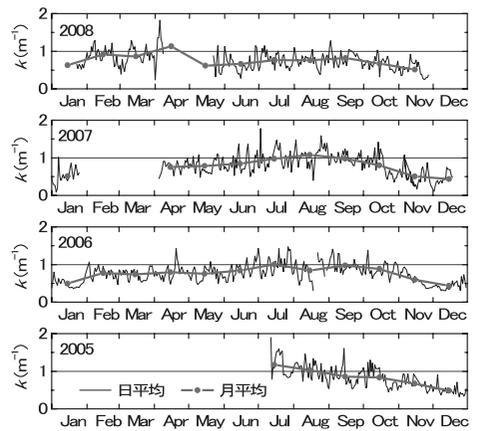


図-7 k の日平均および月平均の経時変化

期(12月, 1月)における k の大きさおよび変動幅はその他の期間に比べて小さく, 夏期(6-8月)のそれらは最も大きい. 短期的な変動特性は藤原(2009)に示されるが, 後述する日変化によるものである.

図-7には, k の月平均値を観測全期間にわたって示し

た. k が最も小さいのは1月, 11月および12月で 0.46m^{-1} - 0.59m^{-1} , 逆に大きくなるのは6月-9月で 0.94m^{-1} - 1.15m^{-1} であった. 一般に. k の大きさは内湾で 0.2m^{-1} - 0.5m^{-1} 程度, 湾奥のかなり濁った海域で 1.0m^{-1} 程度 (徳田ら, 1995)とされていることと比較すると, 大阪湾奥は年間を通して濁りの程度が大きい海域と言える.

5. 考察

(1) 吸光係数 k の経時変化に影響する要因

観測地点は, 前出の図-1に示されるように武庫川および鳴尾川の河口間に位置する. 武庫川からは, 出水時に流出したゴミが漂着するが, 濁水の流入は目視で確認できるほどではなかった. また鳴尾川ではポンプ排水が行われており, 流量は小さい. これらのことから, 観測地点における濁水の影響は他の影響因子に比べて相対的に小さいと考えられた. 前述のように, k が大きくなる期間は水温が高く, 日射量も大きい. すなわち, 水温や日射が植物プランクトンの増殖に好適となる時期に重なっており, これによる水中の懸濁度合いが k の変化に大きく関わっていると推察された.

そこで, k の変動幅が大きい夏期に着目し, 雨量および日射との関係を調べた. 図-8は2006年7月1日から7月28日の4週間における k の経時変化を示すが, 図中には気象庁のホームページに掲載されている神戸の降水量を併せて示した. また, 各図の上部に日降水量を括弧書きした. 図-9は同期間の I_0 を示している. 両図を併せて見ると, 降雨があり日射が小さい7月17日から7月20日では, k の日変化は小さく 1.0m^{-1} - 1.5m^{-1} 程度である. なお, 降水量が最も多かった7月19日の午後に k が大きくなっているのは出水の影響と考えるのが妥当である. ただし, 降水量が小さいと k の変化と降雨の関係は明瞭ではなく, 日降水量が50mmを越えるような場合に降雨の影響が現れる傾向が見られた. 一方, 降水量のない日に着目すると, k は午前から午後にかけて増加する傾向が見られる. 植物プランクトンに関する測定を行っていないため定性的な評価に止まるが, 日射によって植物プランクトンが増殖し, 水中懸濁物質が増大することが k の増加に影響していることが考えられる. また, この期間の日中は南西風が卓越するので, これらの吹き寄せ効果も要因の一つとして可能性がある.

ただし, 7月22日のように日射が十分にある条件でも k が変化しない場合もあり, さらなる検討が必要である.

(2) 日積算光量

干潟や浅場を造成する場合, 造成後に生物が生息できる環境が必要であり, その場合の食物連鎖の出発点となる一次生産者は植物 (プランクトン, 海藻, 海草) であることは前述した. 植物が生長するために必要な一日の

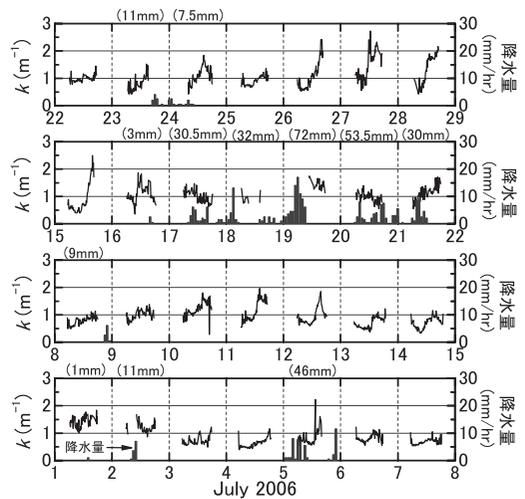


図-8 夏期における k の日変化の例 (2006年)

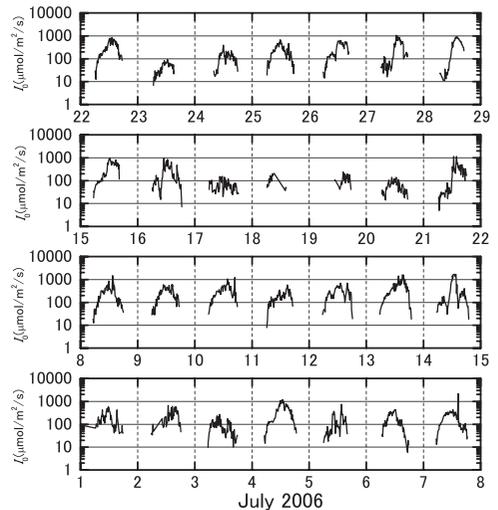


図-9 2006年7月における I_0 の経時変化

積算光量である日補償積算量が一つの目安となる. 本研究では近年その減少が著しく, 干潟や浅場にとって重要と考えられるアマモを対象とした. アマモの光要求量は海藻に比べて非常に高いことが知られているが, 日補償積算量は水温にも依存し, 現地の実測からは春期から夏期では $3\text{mol}/\text{m}^2$, また秋期から冬期では $1.5\text{mol}/\text{m}^2$ 程度 (石川ら, 1990; 川端ら, 1990)とされている. そこで, 式 (4) を用いてD.L.-1.0mおよびD.L.-2.0mにおける日積算値 I_{sum} を算出し, 日補償積算量と比較した.

$$I_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N \Delta t \cdot I_i \dots\dots\dots (4)$$

ここに, Δt は測定時間間隔 (= 600s), N は1日の測定回数 (= 144) である. 図-10は, 式 (4) により算出し

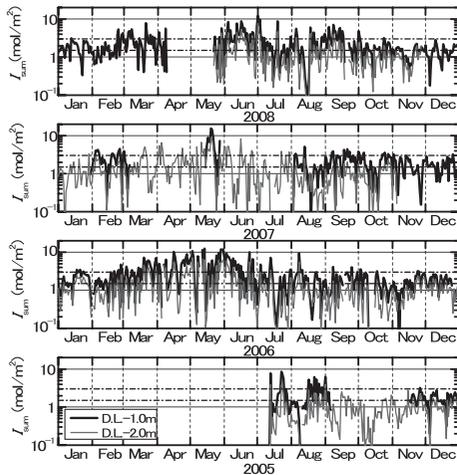


図-10 光子束密度の日積算値

た I_{sum} を示した結果である。図中には、上述のアマモの日補償積算量を一点鎖線で示した。各年とも短期的な変動を除けば、概ね1月から6月にかけては増加し、その後は減少に転ずるが、10月から12月では長期的な変化は小さくなるようである。日積算光量の算出値は、D.L.-1.0mではその季節に対応した日補償積算量とほぼ同等であるが、D.L.-2.0mではそれを下回る期間が長くなるようである。これらの結果から、現在の大阪湾奥部においては、アマモの生育できる限界水深は、D.L.-1.0m-D.L.-2.0m程度であることが推察される。

(3) 日補償点

前節では、日積算量の観点からアマモの生育環境について考察したが、本節では日補償点（限界相対光強度）に着目する。アマモの日補償点は水温によって変わり、阿部（2005）によると、7.7%（10℃）、6.4%（15℃）、7.5%（20℃）および7.9%（25℃）と報告されている。そこで、相対光強度が7%となる海面からの深度を観測結果から推定し、図-11に示した。各年の変化はよく似ている。そこで月平均値の4年間の平均値を算出したところ、2月から10月の期間では3.2m-4.1m、残りの1月、2月および11月ではそれらより約1m大きい5.1m-6.2mとなった。以上より、日積算光量および日補償点の観点からは、現在の大阪湾奥でアマモを生息させるような環境を回復するには、光環境の改善につながる水質の改善が不可欠と言える。

6. おわりに

本研究の結果をまとめて以下に示す。

- 1) 約4年間の現地観測の結果から吸光係数と海面における光子束密度の時間変化を明らかにした。
- 2) 吸光係数は季節変化しており、夏期には植物プラン

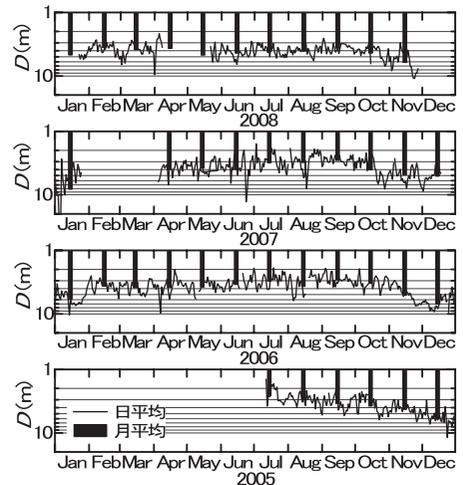


図-11 相対光強度7%となる海面からの深度の推定値

クトンの増殖によると考えられる日変動が見られた。

- 3) 日積算光量や補償深度の観点から、大阪湾奥の環境を考察し、長期に生物生息ができる環境とするには光環境の改善につながる水質の改善が不可欠であることを示した。
- 4) 光子束密度の測定を行う場合、清掃によって受光部の汚濁を取り除くことが精度確保のため必要である。

吸光係数の変化特性については、植物プランクトンの発生量との関係など、さらなる検討が必要と考えられる。

謝辞：現地観測時の機器回収・設置には、東洋建設（株）大阪本店の毛利 順氏（当時、鳴尾研究所）の助力をいただいた。ここに記してお礼申し上げる。

参考文献

磯部雅彦編著（1994）：海岸の環境創造 ウォーターフロント学入門，朝倉書店，pp.58-73。
 環境庁編（1997）：日本の干潟，藻場，珊瑚礁の現況（第1巻干潟），291p。
 徳田 廣・大野正夫・小河久朗（1995）：海藻資源養殖学，水産養殖資源講座，第10巻，緑書房，354p。
 能登谷正浩編著（2003）：藻場の海藻と造成技術，成山道書店，pp.219-222。
 阿部真比古（2005）：アマモ群落の構造と環境特性に関する研究，三重大学博士論文，pp.48-62。
 石川雄介・川崎保夫・本多正樹・丸山康樹・五十嵐由雄（1990）：電源立地点の藻場造成技術の開発 第9報，水中の光条件に基づくアマモ場造成限界深度の推定手法，電力中央研究所報告 U88010，23p。
 川端豊喜・長谷川恒孝・富田伸明（1990）：柳井湾におけるアマモの生長様式とアマモ場造成試験，沿岸海洋研究ノート，27，pp.146-155。
 藤原隆一（2009）：大阪湾奥における海中の光環境，土木学会第64回年次学術講演会講演概要集，II-130。