



REPORT  
OF  
MARINE ECOLOGY RESEARCH INSTITUTE

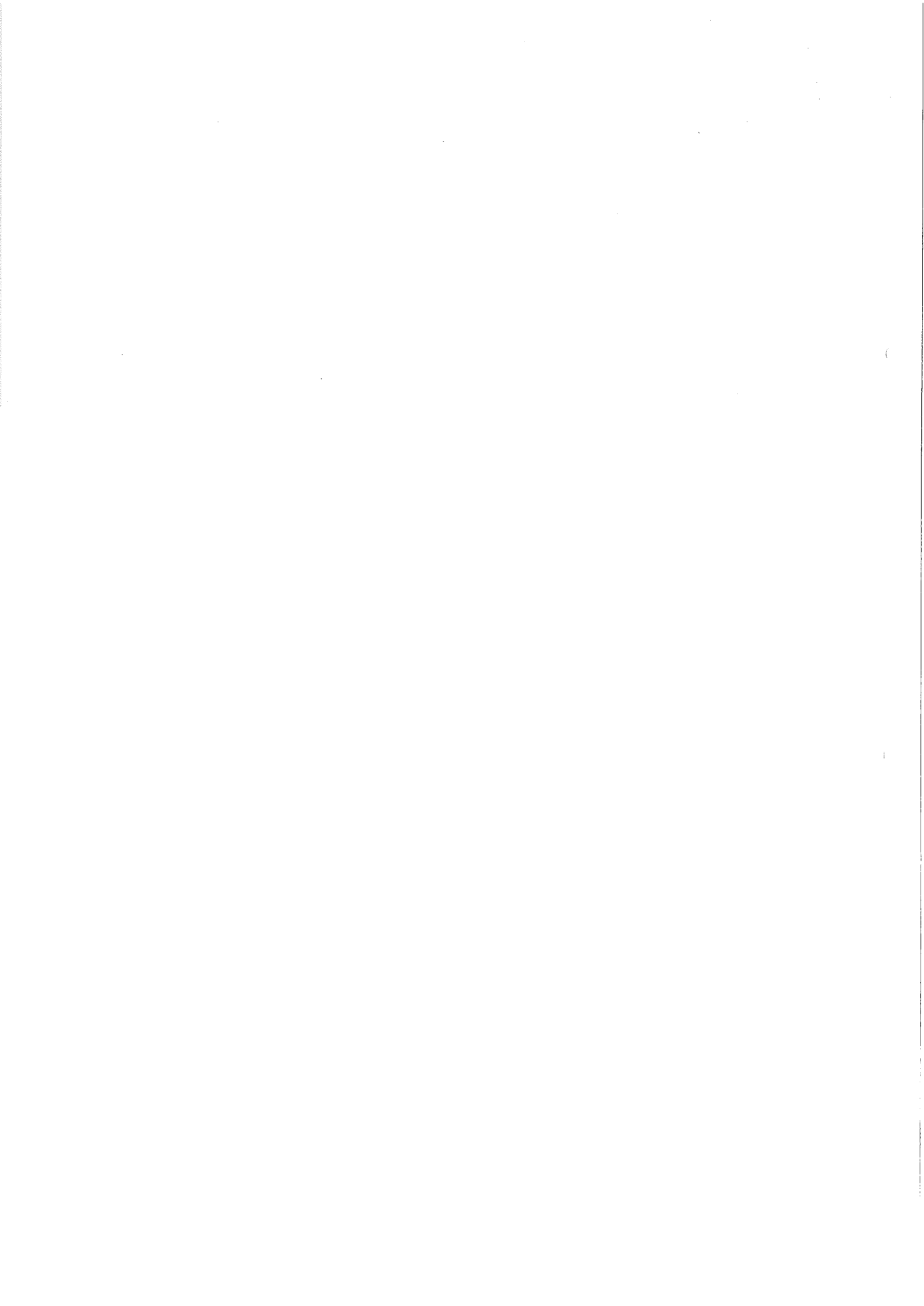
海洋生物環境研究所研究報告

No. 92301

沿岸浅海域における海中懸濁物質と  
溶存有機物質の光学的特性

平成4年3月

March, 1992



## 沿岸浅海域における海中懸濁物質と 溶存有機物質の光学的特性

須藤 静夫・古川 厚<sup>1</sup>

### Optical Characteristics of Suspended and Dissolved Organic Matters in Coastal Shallow Waters

Shizuo Sudoh and Atushi Furukawa

Sudoh, S. and Furukawa, A. (1992). Optical characteristics of suspended and dissolved organic matters in coastal shallow waters. *Rep. Mar. Ecol. Res. Inst.*, No.92301 : 1-29.

**Abstract** : Optical characteristics of suspended and dissolved organic matters in the coastal shallow waters of the Pacific Ocean and the Seto-inland Sea, Japan, were investigated using an underwater photometer and a spectrum beam transmittance meter with wave lengths of 425nm and 690nm. The inherent optical properties of the suspended matters in the sea water varied depending on the areas and seasons. However, the optical properties of dissolved organic matters showed a similarity independent of the areas and seasons. It was found that the relationship between an absorption coefficient at 425nm( $C_y$ ) and a dissolved organic carbon(DOC) was in the following:  $C_y = 0.95(\text{DOC})$ . It was also found that these optical characteristics enabled to clarify the detailed water mass structure in the sea.

**Keywords** : Underwater photometer, Underwater spectrum transmittance meter, Absorption coefficient, Scattering coefficient, Suspended matter, Dissolved organic matter, Extinction coefficient, Optical characteristics.

須藤静夫・古川厚(1992). 沿岸浅海域における海中懸濁物質と溶存有機物質の光学的特性. 海生研報告, No.92301 : 1-29.

**要約** : 太平洋および瀬戸内海の両沿岸海域で、水中照度計、波長別(425nm, 690nm)の測定が可能な水中濁度計を使用して、懸濁物質、溶存有機物質の光学的特性を調べた。懸濁物質の光学的性状は場所、季節によって相違したが、溶存有機物質の光学的性状は同じであり、425nm の吸収係数( $C_y$ )と溶存有機炭素(DOC)の間には、 $C_y = 0.95(\text{DOC})$ の関係が得られた。これらの光学的特性値を用いることによって、微細な海洋構造の相違を把握することが可能であろうという知見を得た。

**キーワード** : 水中照度計、波長別水中濁度計、吸収係数、散乱係数、懸濁物質、溶存有機物質、消散係数、光学的特性。

---

<sup>1</sup> 元(財)海洋生物環境研究所常務理事兼中央研究所長、現在：加温飼育懇談会会長

## 目 次

I. まえがき .....	3	3. 減衰係数 .....	16
II. 調査海域 .....	3	V. 考察 .....	17
III. 測器と測定方法 .....	5	1. 吸収係数, 散乱係数と水体固有の性質 .....	18
1. 水中照度計 .....	5	2. 波長別減衰係数と水体固有の性質 .....	21
2. 波長別水中濁度計 .....	5	VI. まとめ .....	24
3. 採水と分析 .....	6	引用文献 .....	25
IV. 測定結果とデータ整理 .....	7	付図, 付表 .....	26
1. 上方向照度と下方向照度 .....	7		
2. 吸収係数と散乱係数の推定 .....	8		

## 図 表 目 次

第1図 太平洋沿岸における調査海域 .....	4
第2図 瀬戸内海沿岸における調査海域 .....	4
第3図 水中照度計 .....	6
第4図 波長別水中濁度計 .....	6
第5図 御宿沿岸海域における鉛直分布調査定点 .....	9
第6図 福島沿岸海域における鉛直分布調査定点 .....	9
第7図 大阪湾奥海域における鉛直分布調査定点 .....	10
第8図 相生港周辺海域における鉛直分布調査定点 .....	10
第9図 下方向( $E_d$ ), 上方向( $E_u$ )照度の変化(御宿沿岸海域) .....	11
第10図 下方向( $E_d$ ), 上方向( $E_u$ )照度の変化(相生港周辺海域) .....	12
第11図 漸近状態における $a/k_{\infty}$ と $K_{\infty}/c$ の関係 .....	13
第12図 カオリン懸濁液中の波長別減衰係数 .....	18
第13図 吸収係数( $a$ )のSSとDOCに対する依存性 .....	19
第14図 散乱係数( $b$ )のSSに対する依存性 .....	20
第15図 吸収係数( $C_y$ )のDOCに対する依存性(御宿, 福島沿岸海域) .....	22
第16図 吸収係数( $C_y$ )のDOCに対するの依存性(大阪湾奥海域) .....	22
第17図 吸収係数( $C_y$ )のDOCに対する依存性(相生港周辺海域) .....	23
付図1 大阪湾奥海域における表層採水点(5月) .....	26
付図2 大阪湾奥海域における表層採水点(8月) .....	26
付図3 相生港周辺海域における表層採水点(8月) .....	27
付図4 相生港周辺海域における表層採水点(8月) .....	27
第1表 御宿沿岸海域における光学的測定と海水分析の結果 .....	14
第2表 福島沿岸海域における光学的測定と海水分析の結果 .....	14
第3表 大阪湾奥海域における光学的測定と海水分析の結果(5月) .....	15
第4表 大阪湾奥海域における光学的測定と海水分析の結果(8月) .....	15
第5表 相生港周辺海域における光学的測定と海水分析の結果 .....	16
付表1 水平分布調査時における425, 690nmの減衰係数と水質分析結果 (大阪湾奥海域) .....	28
付表2 水平分布調査時における425, 690nmの減衰係数と水質分析結果 (相生港周辺海域) .....	29

## I. まえがき

海洋調査で常に問題となるのが調査方法の立案と得られた結果の解釈である。なかでも変化に富む沿岸浅海域においては各種の要因が絡み合った海洋構造が形成されている場合が多く、この問題は一層複雑である。

一般的に用いられている海洋構造把握のための核となる手法には、海水流動の測定結果から検討していくやり方と、海中に存在する物質の濃度分布等から検討していく場合とがあげられよう。後者の場合、よく利用されている手法の1つにT-Sダイヤグラムがある。この手法は沿岸帯における水平・鉛直方向の微細構造を知るうえで必ずしも万能的なものではなく、これに対して海中の懸濁物質の性状、溶存物質の濃度等から検討していく手法が採用されることがある。これには通常、光測定器が使用される。

海中の基本的な光学的特性に関する調査研究は比較的多く、そのなかにあつて、水産の立場から整理したものに、懸濁物質の光学的性状から貝類養殖場の餌料特性を論じた花岡ら(1956)、古川ら(1956)、古川・岡本(1957)、花岡ら(1960)、古川ら(1961)などの報告がある。

花岡ら(1956)は、透明度とその深さにおける消散係数から、懸濁物質の性状(大きさ)を規定する一つの指標として、懸濁質係数の概念を導入した。古川ら(1961)は、多くの海域で懸濁質係数を測定し、季節、場所によってその値が異なることを示すとともに、その値は微細な海洋構造の相違を表すと述べている。

筆者らも同様の観点から、太平洋および瀬戸内海の両沿岸海域において、水中照度計、波長別(425nm, 690nm)の水中濁度計を使用した測定を行い、懸濁物質および溶存有機物質の光学的性状を知る手法を求めるとともに、その性状の指標となる値について検討し、沿岸域の微細な海洋構造を把握する際に役立つと考えられる知見を得たので報告する。

## II. 調査海域

海況の異なる太平洋沿岸の2海域と瀬戸内海沿岸の2海域で調査を実施した。調査海域および調査時期は以下のとおりである。

太平洋沿岸海域 (第1図)

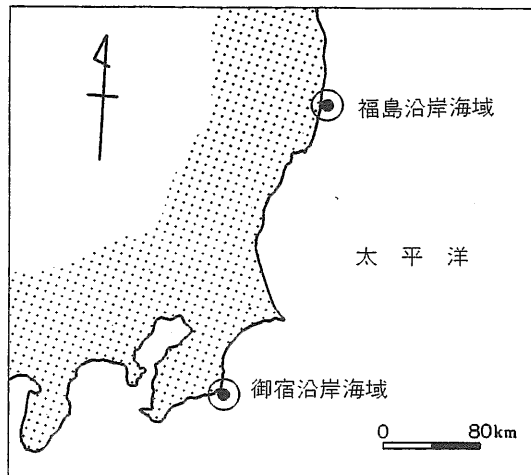
①御宿沿岸海域(調査年月日, 1981年9月17日, 10月13日, 11月18日)

②福島沿岸海域(調査年月日, 1981年12月6日)

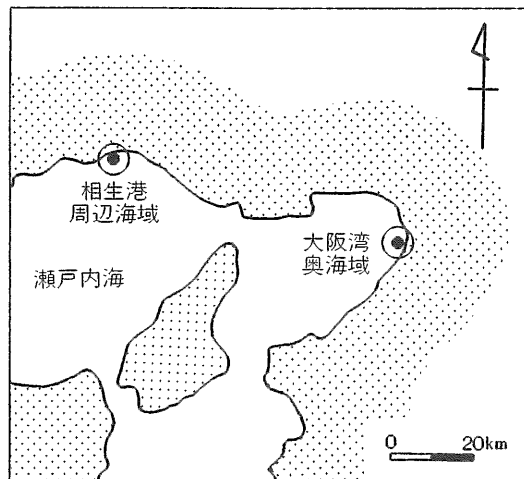
瀬戸内海沿岸海域(第2図)

①大阪湾奥海域(調査年月日, 1982年5月15, 16日, 8月7, 8日)

②相生港周辺海域(調査年月日, 1982年8月4, 5日)



第1図 太平洋沿岸における調査海域



第2図 瀬戸内海沿岸における調査海域

### III. 測器と測定方法

使用した主な測器と測定方法は以下のとおりである。なお、いずれの海域においても同じ測器と測定方法を用いた。

#### 1. 水中照度計

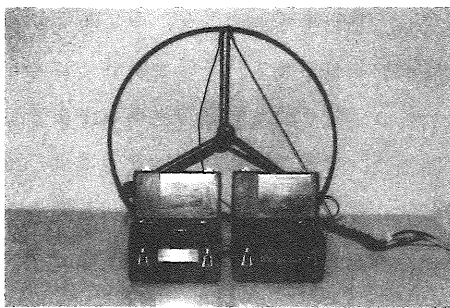
本器は、円形保持枠の中央にシリコン・フォトダイオードを備えた受光部(米国ラムダ社製LI-212S)と、測定操作部であるデジタル万能光度計(同LI-188)から構成されている。視感度補正された受光部からの出力信号は、万能光度計に入り、そこからの出力はデジタル表示されると同時に、記録計への接続が可能である。この光度計には光の強さに応じて $\times 0.1 \sim \times 1.000$ までの、5段階出力レンジ切り換え機構が組み込まれており、フィルター交換が不要である。各レンジでの出力は、光電池特有の照度対光電流の非直線性が補正されているため、照度に対して直線的に変化する。また、1~1,000秒までの時間に対する4段階出力平均回路を備えており、データの使用目的に応じて測定方法をかえることができる。

測定にあたっては、照度計2台を背中合わせに接合し、それぞれの受光部が水平面に対して平行に上・下面を向くよう一体化した測器(第3図)に、水深計を取り付け、これを海面から海底まで下ろすことによって、上方向照度、下方向照度の鉛直分布を同時に、X-Y2ペンレコーダーに連続記録した。

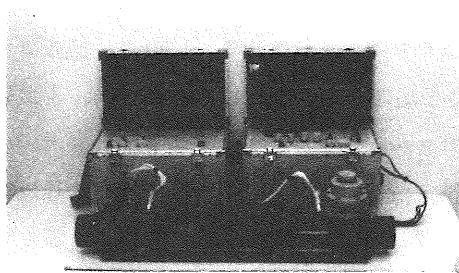
#### 2. 波長別水中濁度計

波長別(425nm, 690nm)の水中濁度計(飯尾電機社製STA-484)は、光路長可変のセンサー部と、アルミ製トランクケースに各種機構を内蔵した電源部、および測定操作部から構成されている(第4図)。センサー部の光源にはハロゲンランプを使用しており、このランプからの光は2枚の干渉フィルター(425nm, 690nm)を経た後、平行光束として海中に入射する。所定の光路長を通過して減衰した光は、集光レンズとピンホールを通過して受光部に達し、電気量に変換される。海中の光学的性状に応じて光路長を変更することができ、センサー部からの出力信号を受けた測定操作部からは、光源の波長別光強度、海中を通過した後の波長別光強度、および両光強度の比率が出力され、これらの出力電圧を連続記録することができる。電源にはAC 100Vを使用する。

測定に際してはまず、光源部から海中への投射面(石英ガラス面)と海中から受光部への入射面(同ガラス面)を柔らかい布でよく拭き、光源部分の過熱を防ぎながら、ランプの光強度が一定になるまで空中で作動させ、光強度が一定になった時点から海中での測定を開始した。鉛直分布調査では、センサー部に水深計を取り付け、海面から海底までの2波長光強度(電圧)をX-Y2ペンレコーダーに連続記録した。また、水平分布調査では、センサー部が海面下約1mに位置するようにロープでフロートを取り付け、これを調査船で曳航した。この場合には自動平衡記録計を使用した。



第3図 水中照度計



第4図 波長別水中濁度計

### 3. 採水と分析

光学的測定と同時に採水を行った。御宿沿岸海域の調査時には採取した海水を直ちに、調査海域に隣接する当研究所に持帰り、予め恒量値を求めておいたニュクリポアー・メンブレンフィルター(0.4 $\mu$ )、あるいはミリポア・フィルター(0.45 $\mu$ )でサンプル海水の一部を濾過した。原海水と濾過して得られた海水は冷凍庫で凍結保存し、全有機炭素(TOC)と溶存有機炭素(DOC)の濃度測定に供した。その他の海域調査では、海水の濾過処理のみ現地で実施し、サンプルは全てドライアイスで凍結して研究所に持帰り、上記と同様の測定に供した。

TOC、DOC濃度の測定には、全有機炭素分析計 524型(米国 Oceanography International社製)を使用し、湿式酸化法によった。すなわち、凍結した原海水と濾過海水のサンプルを室温で解凍した後、550°Cで4時間加熱して清浄にしておいたアンプルに、それぞれ5ml 別々に取り、0.8%リン酸0.2ml、過硫酸カリウム0.2mgを加え、5分間酸素を通気した後、アンプルを熔封した。このアンプルを175°Cで1時間湿式酸化分解して発生した炭酸ガスを、窒素ガスをキャリアとして非分散赤外ガス分析計に導き、積分



計のカウント数を読み取った。一方、シヨ糖の標準溶液を上記と同様に処理して作成した検量線から、サンプル海水のTOC, DOC濃度を求めた。1サンプルに対して5本のサンプル処理を行い、それらの平均値をデータとした。

#### IV. 測定結果とデータ整理

##### 1. 上方向照度と下方向照度

海中における光の吸収と散乱による放射の減衰には、懸濁物質、溶存物質による減衰と水分子そのものによる減衰とがある。これらの相互の関係は複雑であることから、各要因ごとに分離して解析することは難しい。

Jerlov and Nielsen(1974), Jerlov(1976)らは、一般的な放射の減衰を次のように表している。

$$c = a_p + a_y + b_p + c_w \dots\dots\dots(1)$$

- c : 全消散係数
- a<sub>p</sub> : 懸濁物質による吸収係数
- a<sub>y</sub> : 溶存物質による吸収係数
- b<sub>p</sub> : 懸濁物質による散乱係数
- c<sub>w</sub> : 水のみによる消散係数

さらに(1)式は、吸収係数と散乱係数をそれぞれまとめて表示することによって、次のような簡単な式で表すことができる。

$$c = a + b \dots\dots\dots(2)$$

- a = (a<sub>p</sub> + a<sub>y</sub> + a<sub>w</sub>), a<sub>w</sub> は水のみによる吸収係数
- b = (b<sub>p</sub> + b<sub>w</sub>), b<sub>w</sub> は水のみによる散乱係数
- c<sub>w</sub> = a<sub>w</sub> + b<sub>w</sub>

水中に入射した放射は上述のような2つの過程を経ながら減衰していく。この時、水平面より上面(0~180°)の照度を下方向照度(E<sub>d</sub>)、下面(180~360°)のそれを上方向照度(E<sub>u</sub>)という。よく混合した水中では、上・下方向照度は一般に、Lambertの法則にした

がって指数関数的に減衰する。ただし、筆者らによる下方向水中日射量の測定結果では、水深1 m以内で入射した日射量の60~70%が消散した(古川・須藤, 1979)。極表層近くでの日射の減衰は、Lambertの法則にしたがわないのが普通である。

上方向照度、下方向照度の消散係数をそれぞれ $K_u$ 、 $K_d$ とし、上・下方向照度の比率を $R_e$ 。とすると、これらの関係は次のように表すことができる。

$$K_u = -\frac{1}{E_u} \frac{dE_u}{dZ} \dots\dots\dots(3)$$

$$K_d = -\frac{1}{E_d} \frac{dE_d}{dZ} \dots\dots\dots(4)$$

$$R_e = -\frac{E_u}{E_d} \dots\dots\dots(5)$$

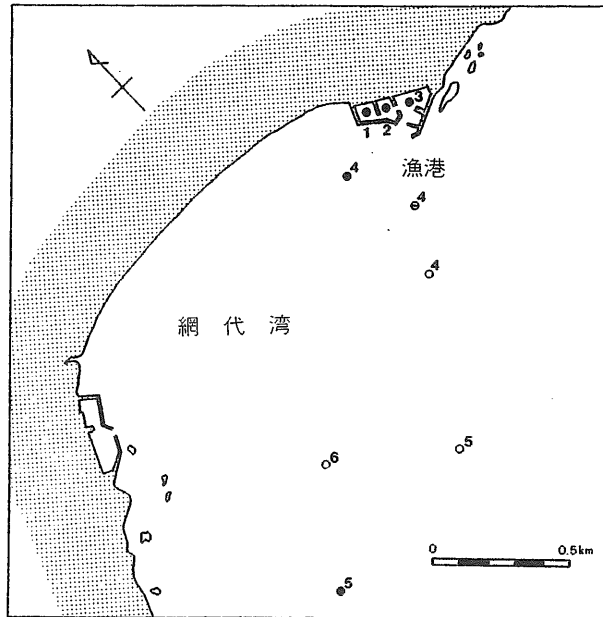
ここに、 $K_u$ 、 $K_d$ は水深( $Z$ )がある深さ以上になると、よく混合した水中では、水深と方向には無関係なある一定の値になるという(Preisendorfer, 1960)。また、水中におけるこのような光学的環境状態を特に、漸近状態(Asymptotic state)と呼んでいるが、このときには、 $K_u \doteq K_d (= K_\infty)$ となり、この値( $K_\infty$ )を漸近状態消散係数(Asymptotic-radiance extinction coefficient)と称する。ここでは $R_e \doteq$ 一定となる。これらの諸量は水体固有の性質と、太陽高度等の周囲の幾何的形狀要素によっても変化する。

各調査海域の測定点(第5~8図)における $E_u$ 、 $E_d$ および $R_e$ に関する測定結果の1例を示したものが第9図と第10図である。上記の光学的現象の一端を理解することができる。

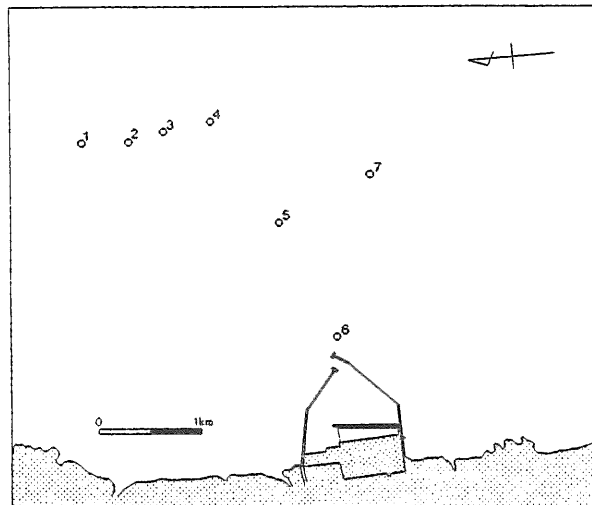
## 2. 吸収係数と散乱係数の推定

Preisendorfer(1959, 1960)は一般的な放射エネルギーに対して、(2)式中の $c$ 、 $b$ の値を必要としないで、吸収係数( $a$ )を求める方法を提唱した。すなわち、屈折率が一定であるとした定常状態の水体に対して、 $a$ を(6)式のように表した。

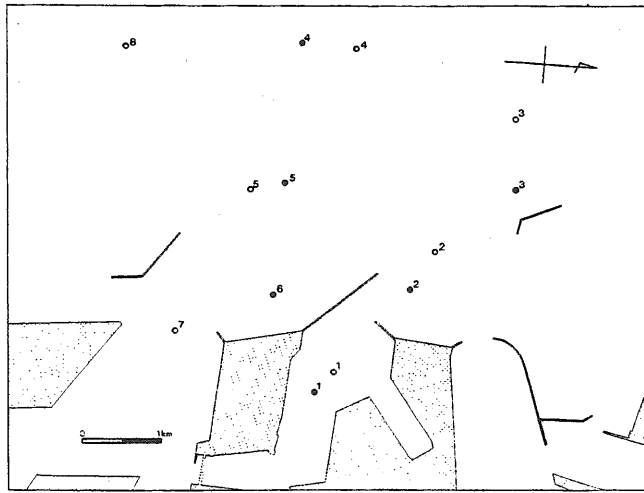
$$a = -\frac{1}{E_o} \frac{d}{dZ} (E_d - E_u) \dots\dots\dots(6)$$



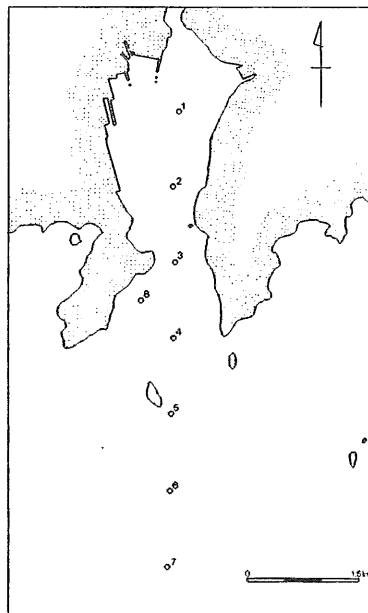
第5図 御宿沿岸海域における鉛直分布調査定点  
数字は定点番号、港内の定点は共通、●：1981.9.17  
⊖：1981.10.13 ○：1981.11.18



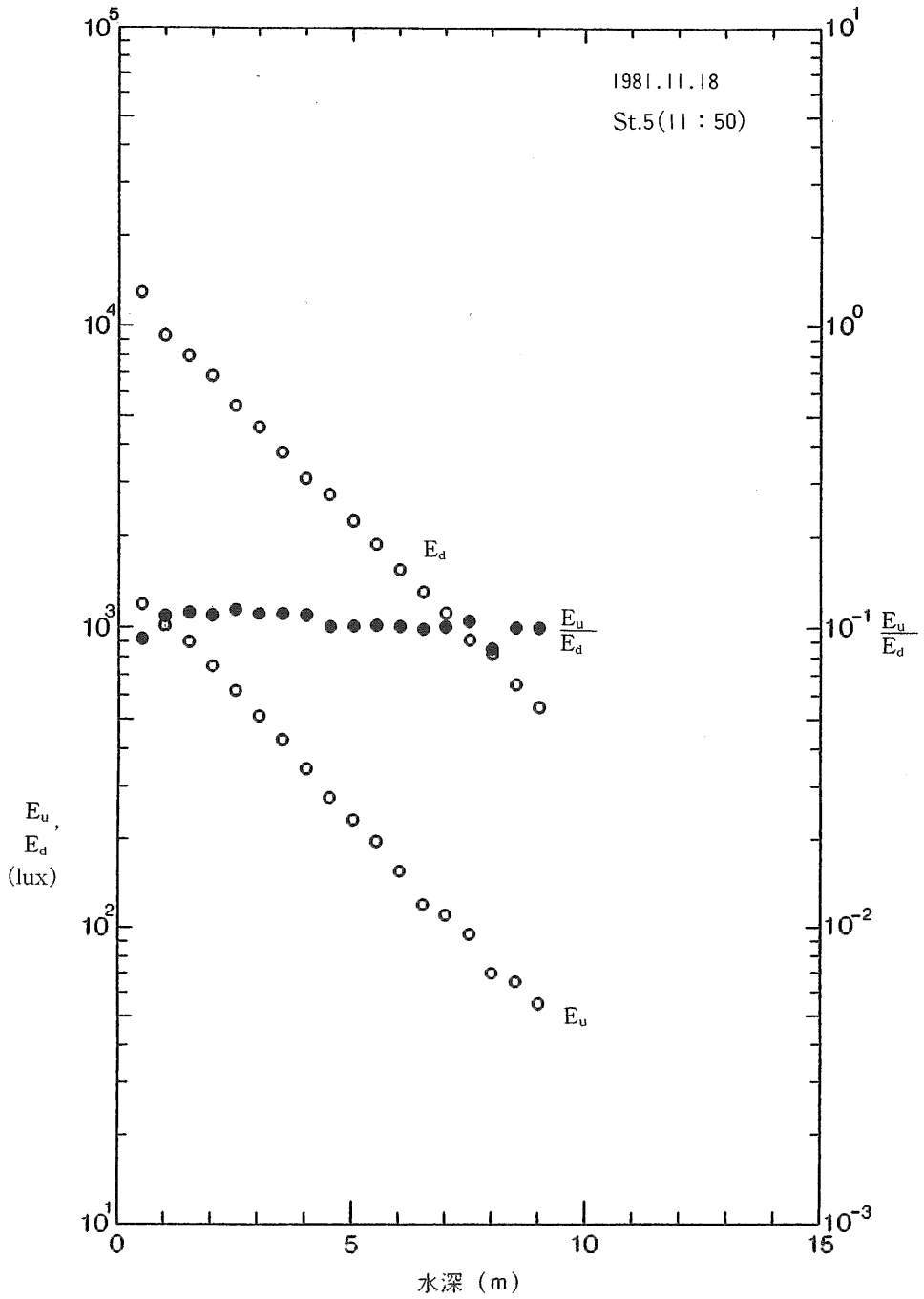
第6図 福島沿岸海域における鉛直分布調査定点(1981.12.6)



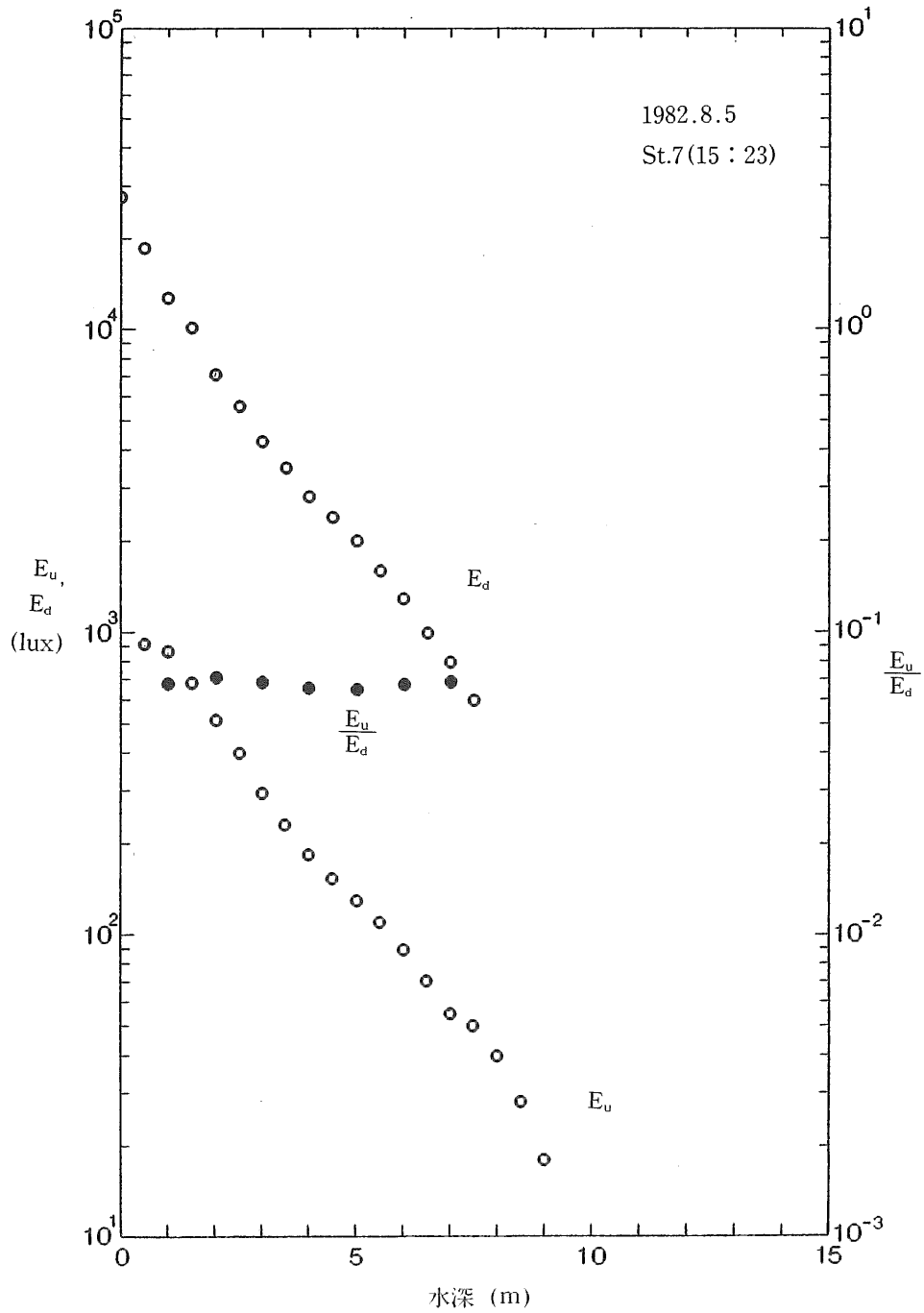
第7図 大阪湾奥海域における鉛直分布調査定点  
(○ : 1982. 5. 16 ● : 1982. 8. 8)



第8図 相生湾周辺海域における鉛直分布調査定点  
(1982. 8. 5)



第9図 下方向( $E_d$ ), 上方向( $E_u$ )照度の変化(御宿沿岸海域)



第10図 下方向( $E_d$ )、上方向( $E_u$ )照度の変化(相生湾周辺海域)

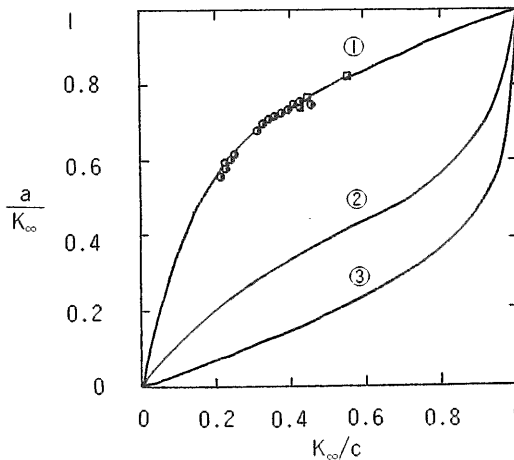
ここに、 $Z$ は水深、 $E_o$ はスカラー照度\*、 $E_u$ 、 $E_d$ はベクトル照度\*\*である。さらに、 $K_\infty$ を次式のように定義した。

$$K_\infty = - \frac{1}{E_d - E_u} \frac{d(E_d - E_u)}{dZ} \dots\dots\dots(7)$$

(2)、(6)式と(7)式より(8)式を得る。

$$\frac{a}{K_\infty} = \frac{E_d}{E_o} \left(1 - \frac{E_u}{E_d}\right) = \left(1 - \frac{b}{c}\right) / \left(\frac{K_\infty}{c}\right) \dots\dots\dots(8)$$

(8)式より吸収係数( $a$ )、散乱係数( $b$ )を推定した。なお、 $E_o$ の値にはBeardsley and Zaneveld(1969)による $E_d/E_o \approx 0.8$ の関係を、また、 $c$ の値には、Timofeeva(1971)の実験結果(第11図)の中で、現場でもよく適合するというmilky mediumに対して得られた $a/K_\infty$ と $K_\infty/c$ の関係を使用した。これらの値とそれぞれの海域における照度の鉛直分布調査から、 $a$ 、 $b$ の値を計算した結果を第1～5表に示した。



第11図 漸近状態における  $a/k_\infty$  と  $k_\infty/c$  の関係  
 ① : milky medium, ② : medium with latex  
 ③ : medium with Rayleigh scattering  
 ○ : Berlin Lakes    □ : Lake Baikal  
 —Timofeeva(1971)より—

\* この値は、受光部に球形の集光器を備えたスカラー照度計を用いて直接測定することができる。  
 \*\* この値は、受光部が余弦法則にしたがって入射光を集光する測器で得られる量である。このことからスカラー照度に対して、この値をベクトル照度ということもある。

第1表 御宿沿岸海域における光学的測定と海水分析の結果

定点	$C_k - C_w (m^{-1})$		a ( $m^{-1}$ )	b ( $m^{-1}$ )	SS ( $mg/\ell$ )	TOC ( $mg/\ell$ )	DOC ( $mg/\ell$ )	調査日時 (1981年)	
	$C_{425}$	$C_{690}$							
1	9.03	7.70	0.84	1.87	10.74	4.07	2.26	9.17	13:07
2	8.42	7.00	0.90	2.23	7.72	2.66	2.10		13:25
3	7.34	5.40	0.69	1.73	7.34	2.58	1.62		12:25
4	7.01	5.40	0.58	1.79	11.06	1.47	1.11		15:16
5	5.49	4.30	0.32	0.99	3.34	1.78	1.23		14:25
-----									
1	6.16	3.10	0.50	1.32	3.38	1.42	1.13	10.13	12:38
2	6.16	3.50	0.45	1.17	3.26	1.64	1.14		14:05
3	4.00	2.90	0.30	0.85	4.28	0.97	0.74		14:15
4	1.61	1.50	0.21	0.58	3.30	0.55	0.53		12:45
-----									
1	6.51	3.76	0.63	1.62	6.42	2.10	1.15	11.18	10:35
1	9.50	5.80	0.64	1.73	5.52	1.59	0.96		13:45
2	9.03	5.88	0.66	1.88	6.11	1.16	0.61		14:00
3	8.15	5.33	0.57	1.41	5.50	1.16	0.58		14:12
4	7.54	5.75	0.48	1.51	7.39	0.94	0.73		12:12
5	5.41	4.23	0.26	0.75	3.89	0.98	0.73		11:50
6	4.35	3.34	0.30	0.80	3.50	1.02	0.75		11:30

( $C_k - C_w$ , a, bは水深5mまでの平均値, 海水分析値は水深1mにおける値)  
 $C_{425}$ ,  $C_{690}$ : 波長別減衰係数, a: 吸収係数, b: 散乱係数, SS: 懸濁物質濃度, TOC: 全有機炭素濃度, DOC: 溶存有機炭素濃度

第2表 福島沿岸海域における光学的測定と海水分析の結果

定点	$C_k - C_w (m^{-1})$		a ( $m^{-1}$ )	b ( $m^{-1}$ )	SS ( $mg/\ell$ )	TOC ( $mg/\ell$ )	DOC ( $mg/\ell$ )	調査日時 (1981年)	
	$C_{425}$	$C_{690}$							
1	5.25	4.34	0.37	0.90	4.47	1.08	0.65	12.6	10:12
2	9.62	8.47	0.40	1.15	5.14	0.92	0.50		11:05
3	12.58	11.81	0.32	0.78	3.98	0.62	0.47		12:05
4	15.62	14.73	0.30	0.84	3.57	0.73	0.57		13:05
5	20.72	18.57	0.34	0.99	4.07	0.77	0.61		14:12
6	31.92	25.25	0.40	1.27	7.57	3.52	0.70		14:41
7	22.95	20.57	0.24	0.68	3.96	0.65	0.64		15:04

( $C_k - C_w$ , a, bは水深5mまでの平均値, 海水分析値は水深1mにおける値)  
 記号は第1表に同じ



第3表 大阪湾奥海域における光学的測定と海水分析の結果(5月)

定点	水深 (m)	$C_k - C_w (m^{-1})$		a ( $m^{-1}$ )	b ( $m^{-1}$ )	TOC (mg/ℓ)	DOC (mg/ℓ)	調査日時 (1982年)	
		$C_{425}$	$C_{690}$						
1	1	10.12	7.55	0.66	1.23	3.57	2.91	5.16	10:13
	10	5.86	3.80	0.30	0.91	—	2.56		
2	1	7.54	6.78	0.67	1.28	4.01	2.41		11:06
	10	3.83	3.04	0.38	1.08	1.55	1.27		
3	1	15.40	13.16	0.68	1.28	6.15	2.38		12:21
	10	1.39	0.99	0.18	0.37	1.86	1.64		
4	1	5.49	4.34	0.62	1.12	4.53	2.42		13:00
	10	2.00	1.21	0.23	0.57	—	1.53		
5	1	7.25	5.88	0.63	1.36	3.45	2.32		13:40
	10	1.66	0.99	0.24	0.64	1.84	1.75		
6	1	4.21	3.14	0.30	0.62	3.74	2.47		14:25
	10	1.61	0.86	0.19	0.49	1.81	1.75		
7	1	5.74	3.14	0.31	0.65	3.77	2.61		15:50
	10	4.79	2.69	0.39	1.13	—	—		

記号は第1表と同じ

第4表 大阪湾奥海域における光学的測定と海水分析の結果(8月)

定点	水深 (m)	$C_k - C_w (m^{-1})$		a ( $m^{-1}$ )	b ( $m^{-1}$ )	TOC (mg/ℓ)	DOC (mg/ℓ)	調査日時 (1982年)	
		$C_{425}$	$C_{690}$						
1	1	10.65	9.11	0.57	1.39	3.73	3.71	8.8	10:20
	5	2.46	1.95	0.25	0.58	—	1.94		
	10	3.20	2.28	0.21	0.54	2.05	2.05		
2	1	7.74	7.81	0.50	1.14	3.09	1.96		11:15
	5	2.55	2.44	0.22	0.50	2.19	1.67		
	10	2.14	2.31	0.19	0.47	1.49	1.49		
3	1	11.64	11.50	0.78	1.43	5.96	2.66		12:12
	5	1.91	1.40	0.46	0.72	1.48	1.45		
	10	1.20	0.68	—	—	1.80	1.34		
4	1	19.34	19.22	0.76	1.27	6.96	4.77		14:54
	5	1.61	1.49	0.20	0.25	1.27	1.25		
	10	—	—	—	—	1.49	—		
5	1	21.69	20.46	0.71	1.20	7.55	5.92		14:10
	5	1.63	1.16	0.05	0.02	2.04	1.45		
	10	1.05	0.65	0.03	0.01	1.58	1.10		
6	1	18.13	17.26	0.68	1.28	7.76	3.04		15:23
	5	1.85	1.35	0.05	0.06	1.64	1.56		
	10	0.67	0.39	0.07	0.07	1.79	0.76		

記号は第1表と同じ

第5表 相生港周辺海域における光学的測定と海水分析の結果

定点	水深 (m)	$C_k - C_w (m^{-1})$		a ( $m^{-1}$ )	b ( $m^{-1}$ )	TOC (mg/ℓ)	DOC (mg/ℓ)	調査日時 (1982年)	
		$C_{425}$	$C_{690}$						
1	1	8.51	7.30	0.63	1.27	3.14	2.09	8.5	10:20
	5	3.49	2.74	0.42	0.91	1.92	1.06		
2	1	8.88	7.75	0.51	1.10	2.80	1.40	11:20	
	5	3.49	2.54	0.34	0.79	0.97	0.94		
3	1	10.54	8.99	0.71	1.37	2.41	1.40	12:19	
	5	3.68	2.85	0.32	0.79	1.25	1.23		
4	1	12.15	10.83	0.52	1.12	3.04	1.61	13:10	
	5	4.56	3.53	0.41	0.94	1.17	1.17		
5	1	12.38	11.55	0.56	1.19	3.69	1.85	13:47	
	5	3.55	2.70	0.39	0.81	1.15	1.12		
6	1	11.42	10.76	0.33	0.67	2.92	2.13	14:27	
	5	4.28	3.17	0.33	0.67	1.72	1.24		
7	1	7.51	6.92	0.41	0.96	2.24	1.62	15:23	
	5	3.49	3.04	0.31	0.69	1.22	1.06		
8	3	6.47	5.44	—	—	1.87	1.49	16:35	

記号は第1表と同じ

### 3. 減衰係数

水中濁度計による測定は、人工光源からの光が海中を通過する際に起こる光量の減衰を利用しており、自然光を光源とする測器とは性格が異なる。そこで、これまでの消散係数(c)と区別するため、水中濁度計を使用した時のそれを減衰係数(C)と呼ぶことにする。

減衰係数を規定する要因は(1)式と同様であり、これらの諸量は光の波長によって変化する。一般に、長波可視域では溶存物質による吸収が無視できるとされている。このことに準ずると、測定に使用した2波長(425nm, 690nm)に対して、(1)式の関係は(9)式と(10)式で表すことができる。

$$C_{425} = C_{p1} + C_y + C_{w1} \dots\dots\dots(9)$$

$$C_{690} = C_{p2} + C_{w2} \dots\dots\dots(10)$$

$C_{425}$  ,  $C_{690}$  : 425nm, 690nmの減衰係数

$C_{p1}$  ,  $C_{p2}$  : 懸濁物質による各波長の減衰係数

$C_y$  : 溶存物質による 425nmの吸収係数

$C_{w1}$  ,  $C_{w2}$  : 水のみによる各波長の減衰係数 ( $C_{w1} \doteq 0.05m^{-1}$ ,  $C_{w2} \doteq 0.5m^{-1}$ )

さらに、海中に存在する懸濁物質の性状が一定ならば、一定波長の光に対してそれによる減衰係数は概ね一定である。懸濁物質がこのような状態にある場合には、(9)、(10) 式中の  $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$  の比 ( $r = C_{p1} / C_{p2}$ ) も一定となる。1例として、カオリンを蒸留水に懸濁させた場合の2波長の減衰特性を第12図に示した。この場合には、 $r = 1.32$  となった。ここで、 $r$  を用いて(9)、(10)式を整理すると(11)式を得る。

$$(C_{425} - C_{w1}) - r (C_{690} - C_{w2}) = C_y \dots\dots\dots(11)$$

(11)式の関係についてはさらに後述するが、各波長ごとの減衰係数 ( $C_{425}$ 、 $C_{690}$ ) を次式で計算した。

$$C = \frac{2.3}{L} \log 1.08 \frac{M_a}{M} \dots\dots\dots(12)$$

L : 光路長

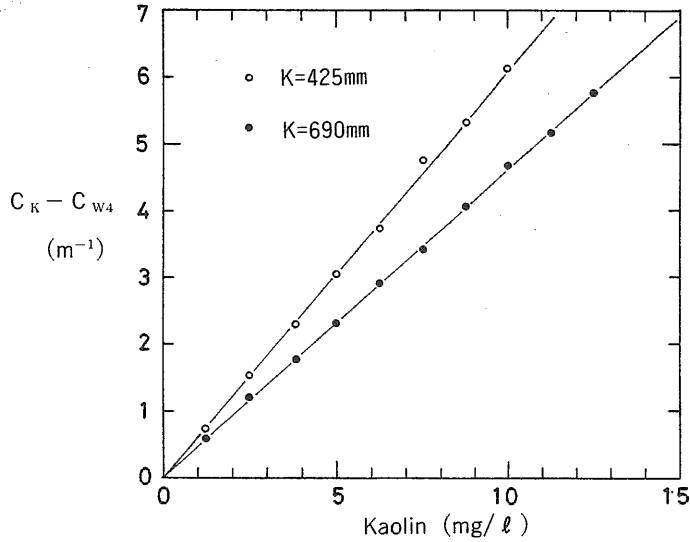
$M_a$  : 空気中での記録計読み値

M : 水中での記録計読み値

測器に使用している板ガラス面は、空気中では空気-ガラス面となり、水中では水-ガラス面となるため、光の反射がそれぞれにおいて異なる。1.08の値はこれに対する補正值である。(12)式より計算した鉛直分布調査時の2波長の減衰係数を第1~5表に整理した。さらに、瀬戸内海で実施した水平分布調査時の各採水点(付図1~4)における減衰係数値を附表1~2に示した。

## V. 考 察

各調査海域で得られたデータに若干の解析を加えることによって求めた諸値(第1~5表、附表1~2)から、海中の懸濁物質と溶存物質の光学的特性について検討した。さらに、海域別に得られたこれらの特性値を用いることによって、海域の水塊構造の変化を抽出できることの可能性について考察する。



第12図 カオリン懸濁液中の波長別減衰係数  
 C<sub>k</sub> : 波長別減衰係数, C<sub>w</sub> : 水の減衰係数  
 — (古川・須藤, 1982より) —

### 1. 吸収係数, 散乱係数と水体固有の性質

吸収係数は主として海中の懸濁物質と溶存物質に依存し, 散乱係数は懸濁物質のみに依存している。海中の懸濁物質と光の関係については, これまでにも多くの報告がある。古川ら(1961)は, 光と懸濁物質の種類, 質等について詳細な測定・考察を行っている。Morrison(1970)は, (8)式の右辺の逆数値を Tyler *et al.*(1959)の結果から1.3とし, いくつかの実験値を用いて K<sub>∞</sub>の値を仮定して, 吸収係数, 散乱係数を推定した。さらに, Morrison(1970)の内容を発展させたものとして, 井上(1977), Di Tro(1978)らの報告をあげることができよう。

海中における光減衰要因となる物質の指標として, 井上(1977)は, SS(懸濁物質)と濾過した海水のCOD(化学的酸素要求量)を用いて, 吸収係数(a)と散乱係数(b)を近似する方式を提示している。ここでも同様に, SSとDOCより, a, bは次式で近似できるものとした。

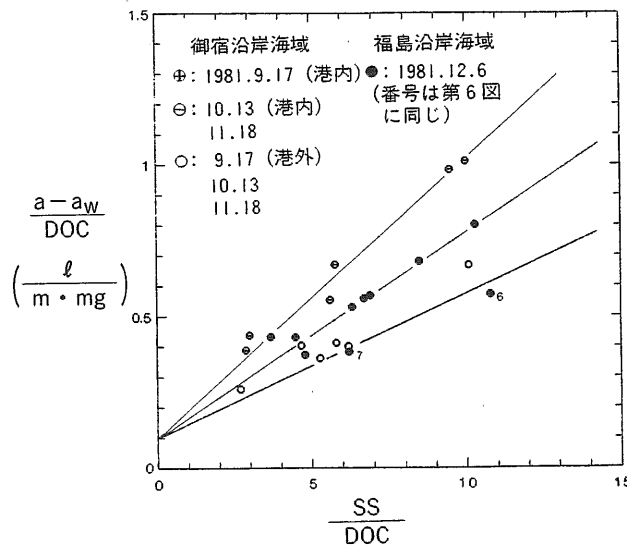
$$a = i_p (SS) + i_y (DOC) + a_w \dots\dots\dots(13)$$

$$b = j_p (SS) + b_w \dots\dots\dots(14)$$

i, j : それぞれの光学的特性を表す係数 (ℓ / m · mg)

ここで、(13)、(14)式中の水の吸収係数( $a_w$ )および散乱係数( $b_w$ )をそれぞれ、 $a_w = 0.008m^{-1}$ 、 $b_w = 0.05m^{-1}$ とした。

まず、吸収係数と両物質濃度の関係について、第1～2表の値を(13)式に適用し、海域ごとの  $i_p$  と  $i_y$  の特性を調べた結果が第13図である。この場合、 $i_y$  (縦軸との交点の値) は吸収係数の溶存有機炭素に対する依存度を表しており、この値が調査海域および季節に関係なく一定 ( $i_y = 0.10$ ) となることを示唆する結果が得られた。



第13図 吸収係数(a)のSSとDOCに対する依存性  
 DOC：溶存有機炭素濃度，SS：懸濁物質濃度  
 a：海中の吸収係数， $a_w$ ：水の吸収係数

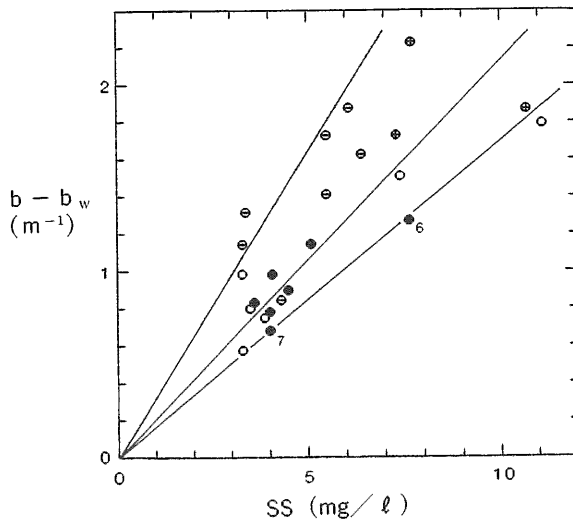
この点に関しては、別途、筆者らが懸濁物質による吸収・散乱特性を調べた過程のなかで、Stuermer(1975)、Bricaud *et al.*(1981)、Baker and Smith(1982)らによる研究成果との比較検討から、555nmの波長帯(本報で使用した水中照度計の最大感度波長)においても、 $i_y = 0.10$ となる結果を得ている(須藤、未発表)。

一方、懸濁物質の依存度を表す  $i_p$  (直線の傾き)は、御宿沿岸海域(港外)では  $i_p = 0.05$ 、また、かなり閉鎖的で、海底の性状は砂質が中心である港外に比べてシルト成分が主体となっている同港内では  $i_p = 0.10$ 、福島沿岸海域(第7図中のSt.6、7を除く)では  $i_p = 0.07$ 、St.6、St.7では  $i_p = 0.04$ となり、吸収係数に依存する懸濁物質の光学的性状は海域、季節によって相違することが示された。この結果と関連して、古川ら(1961)

は瀬戸内海における測定から、やはり季節によって懸濁物質の光学的性状が相違する結果を得ており、その理由として、懸濁物質の粒径が季節によって異なるためであろうと述べている。また、井上(1977)も瀬戸内海における測定から、季節によって懸濁物質の光学的性質—その構成内容—が変化することを述べている。

次に、散乱係数の懸濁物質に対する依存性について、第1～2表中の値から、(14式)の関係を整理した結果が第14図である。御宿沿岸海域(港外)では $0.17 \leq j_p \leq 0.21$ 、同港内では $0.25 \leq j_p \leq 0.32$ 、福島沿岸海域(St.6,7を除く)においては $j_p \approx 0.21$ 、St.6,7では $j_p \approx 0.17$ となり、それぞれの海域で懸濁物質の光学的性状が相違するという点で、第13図と同様の結果が得られた。

そこで、(13)式あるいは(14)式の関係を用いることにより、懸濁物質の性状に関する季節的变化についてはもとより、場所的な性状の変化から、海洋構造をみていくことが考えられよう。一方、溶存物質の光学的特性を表す値( $i_y$ )は、季節、場所にかかわらず一定になると推測され、この値のみから海洋構造について検討することは難しい。しかしながら、 $i_y$ が時間的、場所的に一定であるということは、後述するようにさらに有効な知見を得るうえで極めて重要である。



第14図 散乱係数( $b$ )のSSに対する依存性  
 SS: 懸濁物質濃度,  $b$ : 海中の散乱係数  
 $b_w$ : 水の散乱係数  
 記号は第13図に同じ

## 2. 波長別減衰係数と水体固有の性質

Jerlov and Nielsen(1974)は、水中における光の減衰に関する波長の選択性を調べるため、380nm, 655nmの2波長の減衰係数を比較検討した。その結果から、懸濁物質、溶存物質（主として黄色物質；Yellow substance）による光の減衰には波長による選択性のあることを明らかにするとともに、両波長の減衰係数の関係を(15)式で近似した。

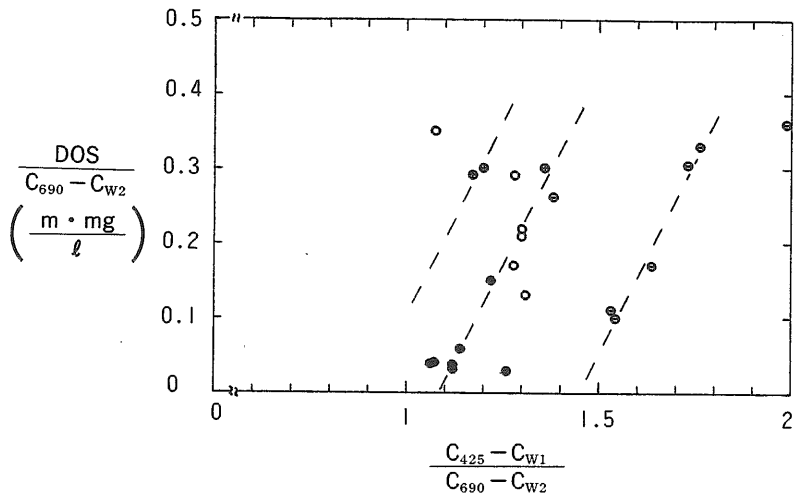
$$(C - C_w)_{380} = 1.8 (C - C_w)_{655} \dots\dots\dots(15)$$

しかしながら、いくつかの海域（Kattegat, The Sound, Baltic Sea）における値は(15)式に適合しなかった。この理由として、これらの海域には多量の黄色物質が存在するためであるとし、このような海域では、それによる吸収係数を直接取り入れた関係を適用した方がむしろ有効であるとした。そこで経験的側面から、380nm, 655nmの波長に関して(11)式と同じ関係を提示した。(11)式中、 $r$ の値は懸濁物質の性状によって変化し、 $C_y$ は溶存物質の濃度によって変化することから、これらの値は場所、時間によって変化すると考えられる。溶存物質による光の吸収は主としてその中の黄色物質によるものであり、この物質は、炭水化物の褐変現象(Maillard 反応)によってつくられる黄色の溶解した有機性の混合物であると言われている(Jerlov,1976)。

そこで筆者らは、(11)式中の $C_y$ が溶存有機炭素(DOC)の濃度に比例するとして、(16)式を仮定した。

$$(C_{425} - C_{w1}) - r (C_{690} - C_{w2}) = K (DOC) \dots\dots\dots(16)$$

第1～5表の測定値を用いて(16)式の関係を第15図(御宿、福島沿岸海域)、第16図(大阪湾奥海域)、第17図(相生港周辺海域)に示した。なお、第16図と第17図中にはそれぞれ1m以浅の水平分布調査の結果(付表1～2)も合わせて示した。この場合でも吸収係数の溶存有機炭素に対する依存度を表す $K$ の値は、季節に関係なく、御宿、福島両沿岸海域では $K \approx 0.96$ 、大阪湾奥海域、相生港周辺海域では $K \approx 0.94$ となり、前述の $i_y$ と同様に、ほぼ一定であると思なされる値になった。これらの値に関しても、Stuermer(1975)が示した沿岸域における光学的諸値から推定した値( $K \approx 0.98$ )と極めて良く一致することが確かめられている(須藤、未発表)。



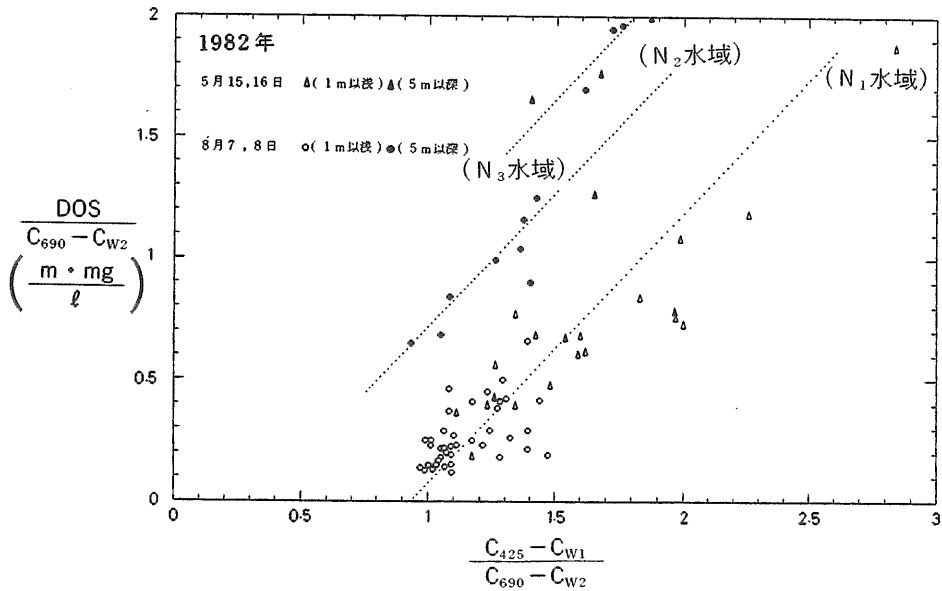
第15図 吸収係数( $C_y$ )のDOCに対する依存性(御宿, 福島沿岸海域)

DOC: 溶存有機炭素濃度

$C_{425}, C_{690}$ : 波長425, 690nm の減衰係数

$C_{W1}, C_{W2}$ : 波長425, 690nm の水の吸収係数

記号は第13図に同じ



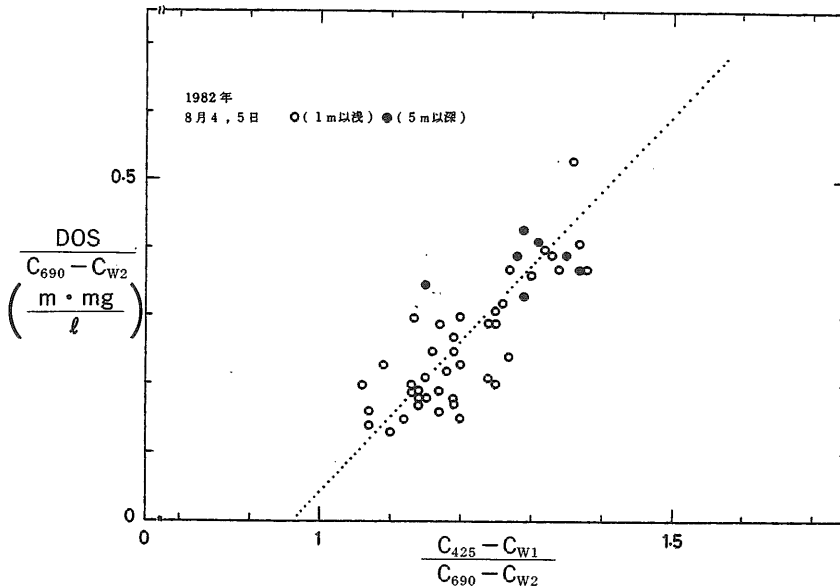
第16図 吸収係数( $C_y$ )のDOCに対する依存性(大阪湾奥海域)

DOC: 溶存有機炭素濃度

$C_{425}, C_{690}$ : 波長425, 690nm の減衰係数

$C_{W1}, C_{W2}$ : 波長425, 690nm の水の吸収係数





第17図 吸収係数( $C_y$ )のDOCに対する依存性(相生港周辺海域)

DOC: 溶存有機炭素濃度

$C_{425}, C_{690}$ : 波長425, 690nm の減衰係数

$C_{w1}, C_{w2}$ : 波長425, 690nm の水の吸収係数

なお、 $i_y$ と $K$ はいずれも吸収係数の溶存物質に対する依存度を表す係数として同じ性質を有するものではあるが、(13), (14)式にみられるように光波長の相違から、両者の値は異なることに注意しておく必要がある。

次に、懸濁物質の光学的性状の指標となる $r$ (横軸との交点の値)は、御宿、福島両沿岸海域(第15図)とも  $0.9 \leq r \leq 1.5$ となり、これによる両沿岸の水域区分に関する結果は、前述の吸収係数(第13図)、散乱係数(第14図)で検討したものと同一になった。

また、瀬戸内海における2海域のうち、大阪湾奥海域(第16図)では5月、8月の調査時とも、1m以浅( $N_1$ )と5m以深( $N_2, N_3$ )で、光学的な水塊構造が相違していたと考えられる結果が得られた。さらに、5m以深でも場所によっては、 $N_2, N_3$ の2水域に分離された。これらの3水域のうち、1m以浅の表層水域( $N_1$ )では  $r \approx 0.94$ 、5m以深の2水域( $N_2, N_3$ )では、 $r \approx 0.35(N_2)$ 、 $r \approx 0.02(N_3)$ となった。

一方、相生港周辺海域(第17図)では上・下層中の懸濁物質の光学的性状はほぼ同じであったと考えられる結果が得られた。この場合では、 $r \approx 0.94$ となった。調査時期がほとんど同じであったことも対応して、大阪湾奥海域および相生港周辺海域の表層海中に存在した懸濁物質の光学的性状は同じであったと推定される。また、太平洋沿岸域で

の  $r$  は、瀬戸内海沿岸域におけるよりも多少大きく、カオリンの性状(第12図)に類似する傾向にあることが推測される。

ここでは、(13)、(14)式を用いる手法とは多少異なり、海中における光の波長特性を利用した減衰係数の関係から、調査海域ごとの懸濁物質と溶存物質の光学的性状について比較検討し、海域さらには水深によっても、懸濁物質の光学的性状が相違している場合のあることを明確に示すことができた。また、(16)式の関係は、同式中の減衰係数を現場で容易に測定することが可能であり、 $K$ の値が海域、季節に関係なくほとんど一定(0.94~0.96  $l/m \cdot mg$ )であるという結果を得たこともあって、消散係数の値を用いた(13)、(14)式よりも利用上簡便であるとともに、懸濁物質の光学的特性値をより明確に表すと考えられる。さらに、海中懸濁物質の分布状態は、海水の流れや拡散に依存する度合いが強いことから、これらの光学的特性値を用いることによって、逆に、海水の動きという点からみた微細な海洋構造を検討していくことが可能であろう。

## VI. ま と め

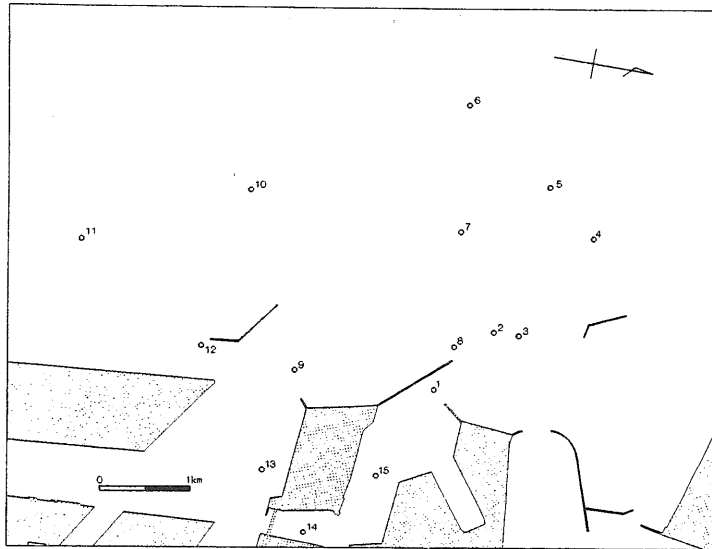
沿岸浅海域における海中の懸濁物質と、溶存物質の基本的な光学的特性を調べた結果から、溶存物質に起因する光学的諸値はほぼ一定であることが明らかになる一方、懸濁物質によるその値は、季節、海域さらには水深によっても相違する場合のあることが確認された。これらの知見に基づいて、懸濁物質にかかわる光学的諸値の変化を利用することにより、詳細な海洋構造を検討していくことが可能であろうという結論を得るにいたった。

沿岸域は水平・鉛直方向とも極めて変化に富む水塊構造を有しており、従来より用いられている流況観測データ、あるいは一般的な水温、塩分といった環境要因から、その微細構造を把握することには限界がある。特に、海底付近では海水の動きが弱く、ここにおける流況データの取得はいろいろな点から難しい面がある。またそこでは、水温、塩分の値が解析に適う程度の変化を示さないのが普通である。

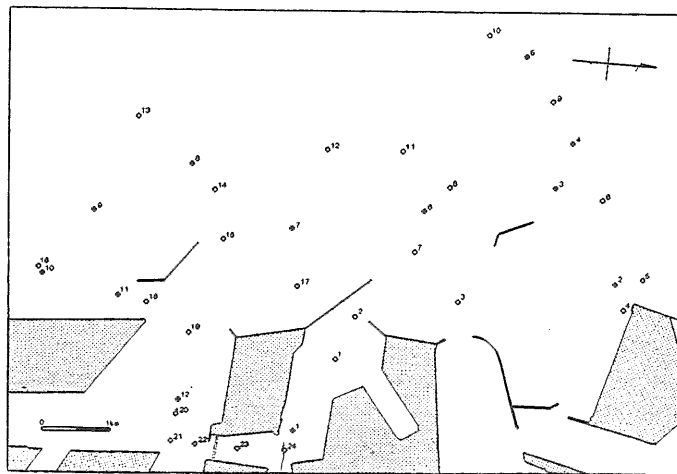
本報で用いた光学的手法は、必ずしも絶対的かつ万能的なものであるとは言えないが、とりわけ上述のような海域においては、これまでの一般的手法とは別な観点から、海洋構造を詳細に調べていくうえで役立つものであると考えられる。

## 引用文献

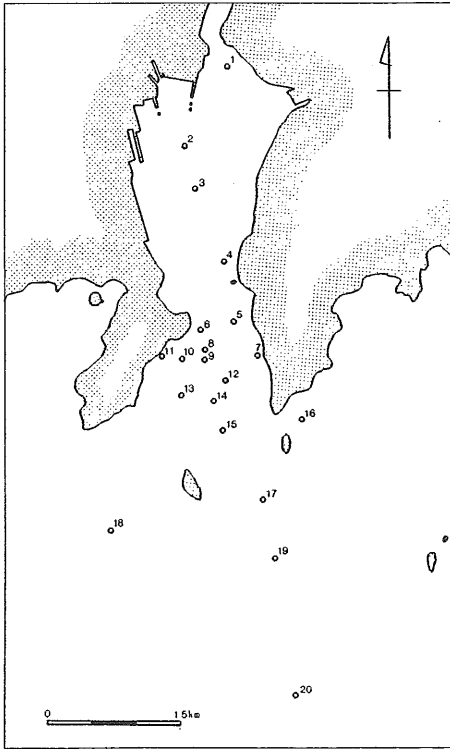
- Baker, K.S. and Smith, R.C.(1982). Bio-optical classification and model of natural water. *Limnol. Oceanogr.*, **27** (3) : 500-509.
- Beardsley, G.F. Jr., and Zaneveld, J. R. V.(1969). Theoretical dependence of the near-asymptotic apparent optical properties on the inherent optical properties of sea water. *Jour. Opt. Soc. Amer.*, **59** (4) : 373-377.
- Bricaud, A., Morel, A. and Prieur, L.(1981). Absorption by dissolved organic matter of the sea(yellow substance)in the UV and visible domains. *Limnol. Oceanogr.*, **26** (1) : 43-53.
- Di Tro, D.M.(1978). Optics of turbid estuarine waters : approximations and applications. *Water Research*, **12** : 1059-1068.
- 古川 厚・小笠原義光・久岡 実・野上和彦(1956). 海水中の懸濁質に関する研究—II. 浅海有機懸濁質の一測定法. 日水誌, **22** (4) : 220-224.
- 古川 厚・岡本 亮(1957). 海水中の懸濁質に関する研究—III. 大型懸濁質の簡易測定量について. 水産増殖, **5** (2) : 38-40.
- 古川 厚・野上和彦・久岡 実・小笠原義光・岡本 亮・小林歌男(1961). 海中懸濁物質並びに主としてその点から見た貝類養殖場の特性に関する研究. 内海区水産研究所報告, (14), 151pp.
- 古川 厚・須藤静夫(1979). 昭和53年度浅沿海水内の太陽エネルギー分布に関する事業報告書. 海洋生物環境研究所, 70pp.
- 古川 厚・須藤静夫(1982). 昭和56年度浅沿海水内の太陽エネルギー分布に関する事業報告書. 海洋生物環境研究所, 21pp.
- 花岡 資・古川 厚・野上和彦(1956). 海水中の懸濁質に関する研究—I. 懸濁質係数(Suspension factor)とその意義. 日水誌, **22** (4) : 213-219.
- 花岡 資・古川 厚・野上和彦(1960). 海水中の懸濁質に関する研究—IV. 懸濁質係数と消散係数および濁度との関係. 日水誌, **26** (5) : 469-471.
- 井上裕雄(1977). 備讃瀬戸中～東部海域における濁りとその構成. 文部省特定研究, 瀬戸内海中中部海域における漁場悪化現象の解明, 香川大学農学部, 3-16.
- Jerlov, N.G. and Steemann Nielsen, E.(1974). *Optical aspects of oceanography*. Academic Press, London, 494pp.
- Jerlov, N.G.(1976). *Marine optics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 231pp.
- Morrison, R.E.(1970). Experimental studies on the optical properties of sea water. *Jour. Geophys. Res.*, **75** (3) : 612-628.
- Preisendorfer, R.W.(1959). Theoretical proof of the existence of characteristic diffuse light in natural waters. *Jour. Mar. Res.*, **18** (1) : 1-9.
- Preisendorfer, R.W.(1960). Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea. Symp. Radiant Energy in the Sea, Helsinki, 1960, *I.U.G.G. Monogr.*, **10** : 11-29.
- Stuermer, D.H.(1975). *The characterization of humic substances in seawater*. Ph. D. thesis, Mass. Inst. Technol.—Wood Hole Oceanogr. Inst., 188pp.
- Timofeeva, V.A.(1971). Optics of turbid waters(Results of laboratory studies). pp.177-219. in : Jerlov, N.G. and Steemann Nielsen, E., *Optical aspects of oceanography*. Academic Press, London.
- Tyler, J.E., Richardson, W.H. and Holmes, R.W.(1959). Method for obtaining the optical properties of large bodies of water. *Jour. Geophys. Res.*, **64** : 667-673.



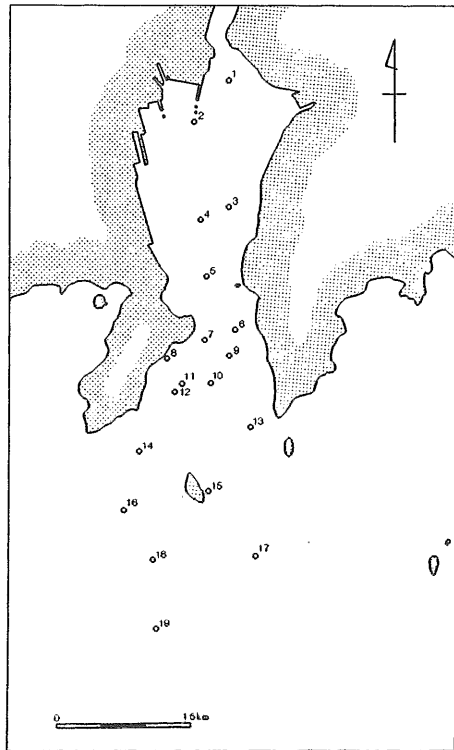
付図1 大阪湾奥海域における表層採水点  
(1982. 5.15, 09:46~14:03)



付図2 大阪湾奥海域における表層採水点  
○ : 1982. 8. 7, 09:34~12:03  
● : 1982. 8. 7, 14:03~16:31



付図3 相生湾周辺海域における表層採水点  
(1982. 8. 4, 10:45~13:10)



付図4 相生湾周辺海域における表層採水点  
(1982. 8. 4, 14:51~16:51)

付表1 水平分布調査時における425, 690nmの減衰係数と水質分析結果 (大阪湾奥海域)  
 1982年5月15日 (9:46~14:03) 1982年8月7日 (9:34~12:03)

採水点	$C_k - C_w (m^{-1})$		TOC (mg/ℓ)	DOC (mg/ℓ)
	$C_{425}$	$C_{690}$		
1	8.48	5.71	4.64	2.68
2	7.25	4.57	3.78	2.76
3	7.25	3.69	4.85	2.89
4	6.69	4.73	4.79	3.20
5	7.45	3.41	4.04	2.68
6	5.99	3.69	4.40	2.25
7	7.06	3.55	8.01	3.82
8	7.25	3.69	4.01	2.77
9	4.72	1.66	5.25	3.11
10	5.66	2.50	4.04	2.95
11	4.00	1.21	2.97	2.05
12	9.15	4.57	5.30	3.29
13	8.26	3.98	4.81	2.72
14	8.05	5.04	4.45	3.43
15	8.70	4.42	4.08	3.40

1982年8月7日 (14:03~16:31)

採水点	$C_k - C_w (m^{-1})$		TOC (mg/ℓ)	DOC (mg/ℓ)
	$C_{425}$	$C_{690}$		
1	8.48	6.50	3.74	2.75
2	—	—	2.78	1.67
3	12.68	9.13	2.34	1.89
4	—	—	1.85	1.78
5	13.70	9.32	3.90	1.73
6	12.42	11.40	5.06	2.20
7	11.09	10.47	5.88	2.32
8	14.17	13.57	7.02	2.26
9	17.31	17.74	7.12	2.30
10	16.60	16.55	7.11	2.50
11	16.12	15.21	6.74	2.06
12	12.74	9.67	3.37	2.53

採水点	$C_k - C_w (m^{-1})$		TOC (mg/ℓ)	DOC (mg/ℓ)
	$C_{425}$	$C_{690}$		
1	7.37	6.80	3.10	2.53
2	9.18	8.50	6.74	4.16
3	5.62	4.37	2.66	2.19
4	6.31	4.37	2.26	1.79
5	9.42	6.79	2.33	1.95
6	10.72	8.04	3.27	2.07
7	11.90	10.84	7.44	2.88
8	9.67	7.82	5.15	5.15
9	12.54	11.77	2.97	2.32
10	10.45	10.00	3.49	2.23
11	9.67	8.27	6.58	2.03
12	16.59	15.19	6.69	2.27
13	18.19	18.70	6.65	2.66
14	17.31	16.86	7.18	2.50
15	13.80	11.40	6.70	2.60
16	17.31	16.96	7.05	2.25
17	18.82	14.75	—	2.59
18	12.68	11.59	6.70	2.69
19	10.65	9.73	3.31	1.18
20	10.92	9.83	3.40	2.27
21	6.58	5.37	2.78	2.44
22	7.64	5.99	2.81	2.48
23	8.43	6.65	2.82	2.54
24	5.56	4.00	2.26	2.65

記号は第1表に同じ



