

内灣に於ける水中照度*

花岡 資・村上 彰 男

(内海区水産研究所)

On the submarine illumination of bay water

Tasuku HANAOKA and Akio MURAKAMI

Various ecological values such as the compensation depth have been calculated frequently by the equation $uT = \text{const.}$, where u is extinction coefficient and T is the visible depth of Secchi disc. But the kind and composition of the matters suspended especially in bays and estuarines seems to alter the optical character of the water mass, resulting in modified relation between u and T .

The present authors induced from their results of observations, a in the equation $I_T = I_0 \exp(-aT^{0.7})$ where T : the depth of Secchi disc, I_T : the illumination at the depth T , I_0 : that of sea surface, to depend on the character of suspended matter, showing the value 2 in estuary at the case of flood, 1-0.4 in bay water and 0.4-0.1 in the oceanic water.

The distribution of the value of a coincides fairly with that of other oceanographical properties such as surface chlorinity. Using this relation, the compensation depth of phytoplankton and daily one can be obtained approximately from next equations.

$$Z_c = \frac{\log I_0 - \log I_c}{a \log e} T^{0.3} \quad (Z_c : \text{compensation depth} \\ I_c : \text{illumination at } Z_c)$$
$$Z_{cd} = \frac{0.18 \log J_r - 0.093}{a \log e} T^{0.3} \quad (Z_{cd} : \text{compensation depth for 24h} \\ J_r : \text{daily radiation from sun and sky})$$

Hence, the value of Z_c/T is not constant but changes with the values a and T .

水面生産力に於て、その大いさを決定するものに自生的なものと、他生的なものと考えられるが、植物体の同化生産は前者の基礎として意義をもち、従つてそれに不可欠の要件である水中照度の問題は古くから研究が行われてきた。しかしそれは多くは純水や沖合の比較的清浄な海水に於ての観測が主で、沿岸水や内湾水のように量的にも質的にも多種多様の微細懸濁物を有する水中での実際の場合については、未だ観測は不充分のようである。此のような水塊での水中照度はその濁度乃至懸濁物質との関係に於て可成り複雑の情況にあることは既に一般に認められている。筆者等は湾内水塊の生産層測定のために東京湾其他の内湾で観測を行ったが、その結果からも同様な複雑な関連性が認められたので此処に報告することとした。

湖沼や内湾で之等の実態を明かにすることは将来の問題であらうが、それは自生的な水面生産力に重要な意味を持つと同時に、他生的な即ち陸上其他から流入する有機体をも含み水中の物質循環乃至生産に与るものとして最近各方面から注意せられている水中の微細懸濁物との関連に於て興味ある問題を提供するものと考えられる。

以下の観測記録は全てセレンウム光電池による水中照度測定器を用いたものであり、filterは使っていない。

1. Secchi板による透明度深度に於ける明るさ

Secchi板による透明度の深さは、表面照度の大小にあまり関係なく、板からの反射光 (D) と板よりも上層の水中からの散乱光 (D_1) の和と、板外の水からの散乱光 (D_0) との相対量

$$\frac{D + D_1 - D_0}{D_0}$$

によつて決定されるとされている。又一方実測値としては、表面照度 (I_0) に対し、透明度深度 (T) での

*内海区水産研究所業績第42号

照度 (I_z) は9.9~22.6% (POOL & ATKINS, 1924)⁽¹⁾, 8~29% (CLARKE, 1941)^{(2),(3)}等の値が出され、平均15~16%というのが従来一般的に用いられ、種々の計算の基礎にもされてきている。之等の可成り大きい振れについて、そのどれ丈が観測誤差で、どれ丈が水の光学的性質によるものかは問題とされているが、尙未解決のようである。

透明度の深さ T の大いさは表面に入る照度 I_0 の大いさには殆ど関係がないとしても、その深さの照度の絶対値 I_z は当然 I_0 によって異なる。実測した各深度の照度 I_z の対数を深度に対して図上にとれば、

$$I_z = I_0 e^{-\mu z} \quad (Z: \text{深さ } m, \mu: \text{消散係数})$$

に従って同水域で μ が一定の限り両者の関係は直線的になり、水域が異なり μ が変れば、それに従って曲線の経過をとる。今、 T は I_0 によって変らぬとして $I_z/I_0 \times 10,000$ の値 (即ち表面に一樣に10,000luxの光が入った場合の深さ T に於ける照度) を I_t として求め、之を東京湾其他で実測した結果について比較すると第1図のようになる。(之等の記録中、実測 μ の値については、一部は既に報告した)⁽⁴⁾

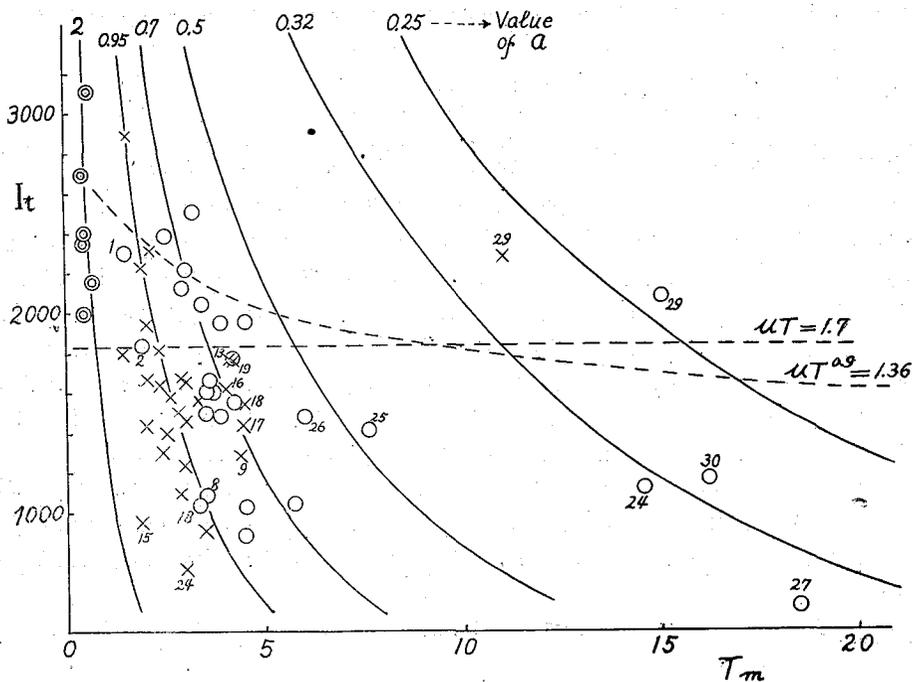
Fig. 1. The relation between I_t (submarine illumination by Percentage $\times 100$ of the surface intensity) and visible depth of Secchi disc.

Curves are calculated by the equation $I_t = I_0 \exp(-aT^{0.7})$

Nos. represent station-Nos.

◎: Hiroshima Bay after flood, ×: Tokyo-Bay, June, 1948,

○: Tokyo-Bay, december, 1948



第1図を見ると、或る水域、或はそのある時期の値が一つの群を作る傾向があるのが見られる、即ち広島湾の洪水の際に於ける、透明度の極く小さい1群、東京湾の6月並びに12月の透明度5m以下のもの、及び東京湾の外海性水域に属するもの等が夫々1の群を成している。只6月の群の中に12月のSt. 1, 2, 8及び18が入り込み、逆に12月の群に6月のSt. 9, 13, 16, 17, 18及19が混入している。6月と12月の海泥を比較すると、6月は明かに沿岸水乃至淡水が発達して一般に低塩分を示し、透明度も低く、陸上 origin 乃至微生物の存在による濁度が高いことを推定せしめる。而して6月の値のうち、12月の群に入っている各点は湾の中央部、特に湾口に近い南部の中央部に位するものであり(第2図)、又之等の点の各深度のCl%を見ると

Table 1.

St.	VI-17~19, 1948, Tokyo-Bay					X-29~XI-2, 1948, Tokyo-Bay					VII-16, 1951, Hiroshima-Bay							
	Cl %			T (m)	I _t	Z _c (m)	Z _c /T	Z _{cd} (m)	St.	Cl %			T (m)	I _t	Z _c (m)	Z _c /T	Z _{cd} (m)	St.
	0 m	5 m	10m							0 m	5 m	10m						
1	12.92	14.53		1.5	2890	—	—	4.85	1	16.60	16.70		1.5	2310	2.9	1.93	4.0	0
2	17.23	14.16		2.0	1950	4.26	2.13	5.2	2	16.28	17.57		1.9	1840	4.0	2.10	4.2	1
3	16.80	17.64	18.16	2.2	2315	5.94	2.70	6.1	5	17.61	17.64	17.60	2.9	2110	6.3	2.17	6.2	2
4	16.16	17.29	18.01	2.8	1515	9.01	3.22	6.2	6	17.60	17.62	18.05	3.9	1480	7.3	1.97	6.9	3
5	16.46	17.38	18.11	2.4	1650	7.20	3.00	5.5	7	17.04	17.03	18.39*	4.2	1770	8.3	1.97	8.2	4
6	17.76	17.19	17.80	1.9	2240	5.34	2.81	5.2	8	17.13	17.31	17.81*	3.5	1080	6.0	1.71	5.4	5
7	15.36	16.19	17.88	2.0	1670	3.04	1.52	5.0	9	17.43	17.60	17.45	4.5	870	6.8	1.51	6.3	6
8	16.02	17.09	17.29	2.5	1410	3.70	1.48	5.5	10	16.51	17.40	17.63	3.0	2210	7.6	2.53	6.9	
9	17.35	17.31	17.52	4.4	1300	12.60	2.86	7.5										
10	17.12	17.49	17.97	3.3	1560	8.50	2.58	7.1										
11	16.01	17.57	18.28	2.4	1340	6.06	2.52	5.3	11	17.51	17.50	17.50	3.6	1600	7.2	2.00	6.7	
12	17.24	17.38	18.27	2.3	1820	5.19	2.26	5.6	12	17.56	17.65	17.54	3.4	2040	7.5	2.20	7.2	
13	17.33	17.40	18.44	4.1	1785	—	—	—	13	17.25	17.74		3.5	1605	7.9	2.26	6.3	
14	17.17	17.23	17.84	3.0	1250	6.03	2.01	6.1	14	17.49	17.46	17.51	4.5	1015	7.7	1.71	6.2	
15	16.43	17.12	17.62	1.9	977	4.06	2.13	4.2	15	17.68	17.68	17.61	3.2	2500	8.0	2.50	6.9	
16	17.56	17.94	18.20	4.1	1635	—	—	—	16	18.08	18.07	18.07	3.5	1500	8.2	2.34	7.3	
17	16.42	18.01	18.40	4.5	1450	—	—	—	17	17.68	17.66	17.81	3.9	1955	8.4	2.15	7.8	
18	16.48	18.51	18.39	4.5	1545	—	—	—	18	17.67	17.65	17.65	3.3	1030	6.5	1.97	5.1	
19	17.88	17.93	18.18	4.2	1760	—	—	—	19	17.67	17.68	17.99	2.5	2380	7.4	2.96	6.0	
20	17.02	17.31	17.86	2.0	1450	5.00	2.50	5.1	20	17.81	17.91	17.99	3.6	1650	8.4	2.33	7.2	
21	16.74	17.05	18.19	1.4	1800	4.30	3.07	3.2	21	17.52	17.55	17.64	4.2	1550	8.1	1.93	7.7	
22	17.70	17.74	18.05	2.9	1100	5.30	1.83	5.9	22	18.22	18.26	18.34	5.7	1030	10.5	1.84	8.6	
23	17.44	17.50		3.0	1463	—	—	—	23	18.22	18.18		4.5	1950	9.3	2.06	9.2	
24	16.35	17.63	18.25	3.0	722	3.76	1.25	4.3	24	18.86	18.86	18.92	14.5	1110	25.8	1.78	24.2	
25	16.27	16.74	17.54	3.5	909	5.10	1.46	6.4	25	18.36	18.36	18.64	7.6	1410	13.9	1.83	12.8	
26	17.05	17.52	17.94	2.9	1680	9.26	3.20	6.4	26	18.38	18.38	18.47	6.0	1480	16.0	2.66	10.4	
27	16.05	18.04	18.21	2.6	1585	7.00	2.69	5.8	27	18.86	18.86	18.86	18.5	520	30.0	1.62	23.0	
28	16.82	17.04	17.95	3.0	1665	6.80	2.27	6.7	28	18.89	18.89	18.89	16.2	1160	25.7	1.59	26.0	
29	18.41	18.74	18.87	11.0	2275	—	—	30.0	29									

T : Transparency depth by Secchi disc.

I_t : Submarine illumination at depth T, assuming Om illumination as 10,000 luxes.Z_c : Compensation depth.Z_{cd} : Compensation depth for 24 h.

* : Depth 20m.

** : Computed by the equation (9), using the value J_R (daily mean radiation from the sun and sky for the month) of Tokyo Meteorological Observatory.

Fig. 2. The surveying stations in Tokyo-Bay.

St. 1-21: Inner bay, St. 22-26: Uruga Channel
St. 27-30: Mouth part



(第1表), 明かに他の点より高く, 陸水よりも沖合水の影響を多くうけていることが認められる。又逆に12月のもので, 6月の群に入っているものは河口, 港口に近く, 又Cl%の低い St. に当るものであることが認められる。(此際, 消散係数 μ の値が上下層で多少差のあるもの即ち濁度に於て成層の見られる場合でも, 水の集団性にはあまり影響して出て来ないので第1図には全測点をとっている。)

之等の点から考へて, 各群に属する station の水は群毎に夫々特有の懸濁物 (所謂 yellow substance の如き溶存物も含めて) を有し, その性質によって透明度の深さに於ける明るさが規定されるのではないかと想像される。又此の1群の I_t と T との関係から認められるように, 同じ I_0

をうけても, I_t は T の小さい程大となり, 両者の関係は略

$$I_t = I_0 e^{-aT^b} \quad (1)$$

の形で表わされ, 且図によれば, 群毎に a の値は異なるが, b の値は各群とも同じで, $b=0.7$ と認められる。

之等の関係は POOL & ATKINS が統計的に出した式

$$\mu T = 1.7 \quad (2)$$

からは出て来ない関係であつて, 此の式を適用すれば, $I_t = 1835 \text{ lux}$ なる一定値になる筈である。又著者の1人花岡が統計的に出した式

$$\mu T^{0.9} = 1.36 \quad (3)$$

を用いても極く近似的に止り, 個々の場合は示し得ない, 而して之等2式とも上記各群の平均値を示す一の近似式のように思われる。

(第1図)

前記の $D+D_1 - D_0 / D_0$ の値がある Constant 以下になる深さが透明度の深さであるとする式でも, 水中に Homogeneous に分布しているとした時の粒子による散乱光が多くて, D_0 及び D_1 が大になった場合 その大きくなり方に少くもあまり差がないと, 上式を成立さす為には D も亦大にならねばならぬことから, 透明度の深さでの明るさ乃至透明度の深さは, 散乱光の大小によって変化するであろうし, 粒子による光の散乱と吸収の相対的の大きさ如何によって, その影響は色々なることが考えられるから, 水中の懸濁物の質的組成及び量が如何に水中照度乃至透明度の深さに影響を及ぼすかは将来個々の場合に精密に研究されねばなるまい。

2. a の値による水塊の分類

透明度の深さ及びその深さでの照度の間に, 若し上記のような関係があるなら式(1)の a の値によって水塊を分類した場合, 他の factor による分類との間に何か関連性が生じる筈である。東京湾の場合は第3, 4 図の

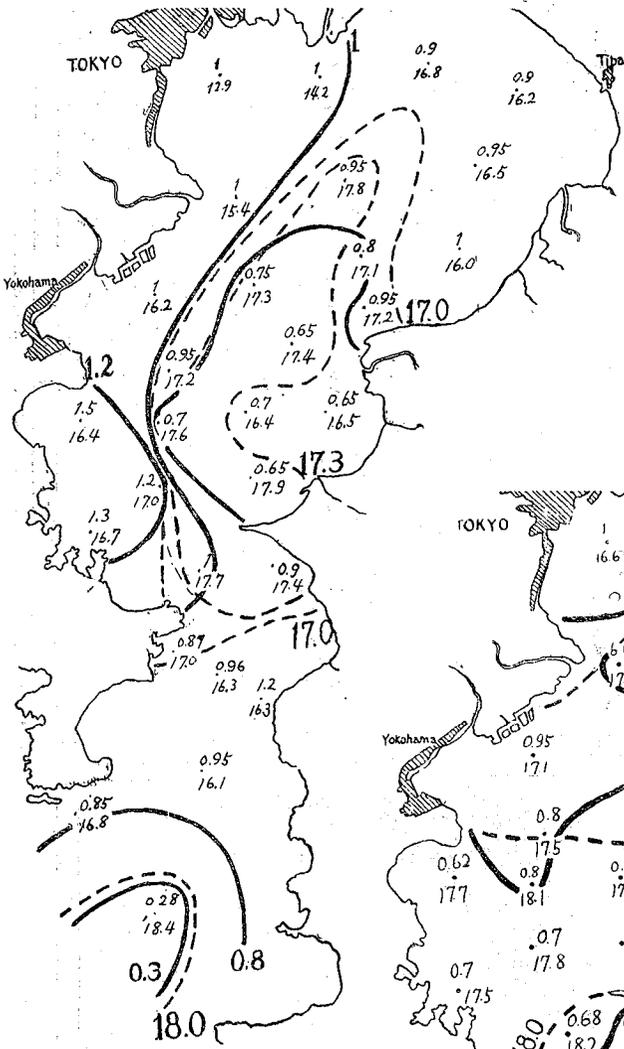


Fig. 4. Distribution of a in Tokyo-Bay, December, 1948.

—— a -Value contour
 - - - - Surface chlorinity contour

Fig. 3. Distribution of a in Tokyo-Bay, June, 1948.

—— a -Value contour
 - - - - Surface chlorinity contour

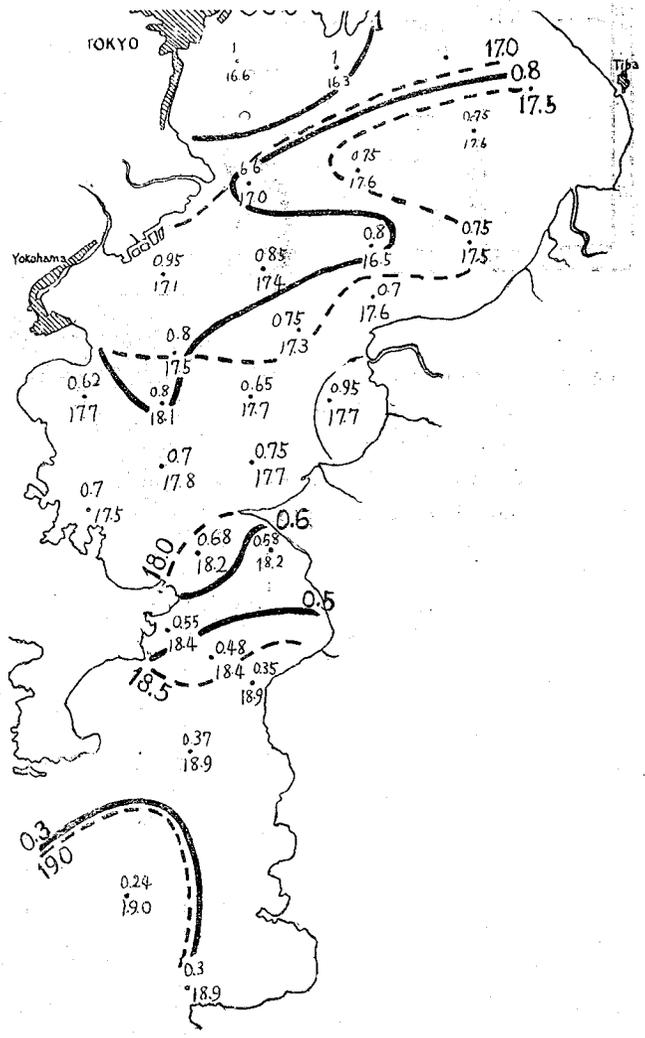


Fig. 5. Distribution of a in Kaida-Bay, August, 1950.

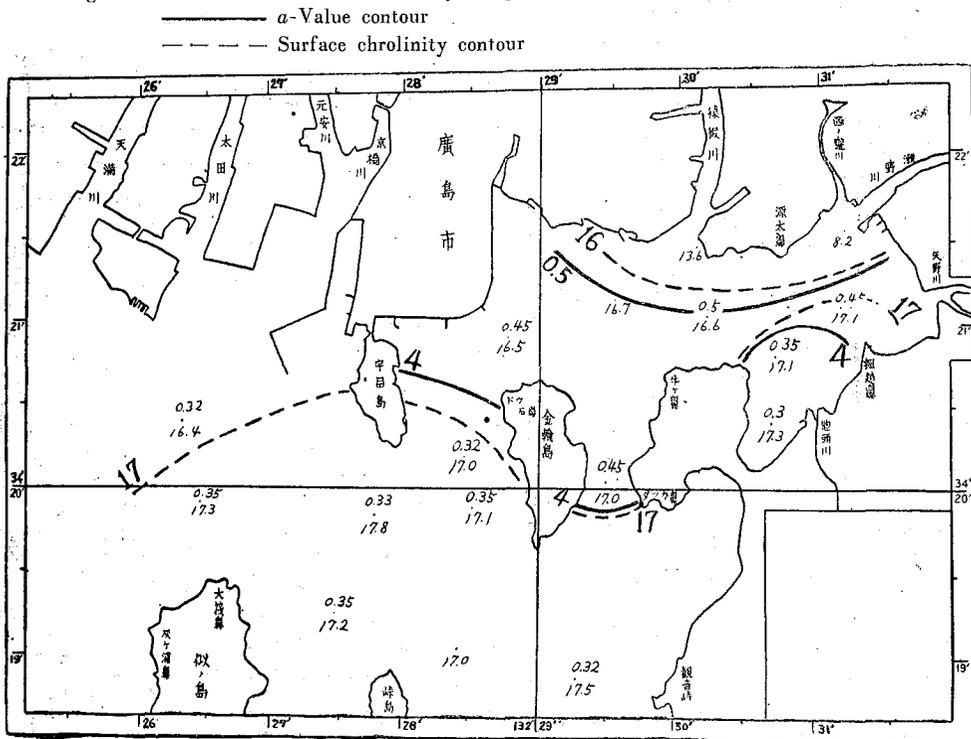
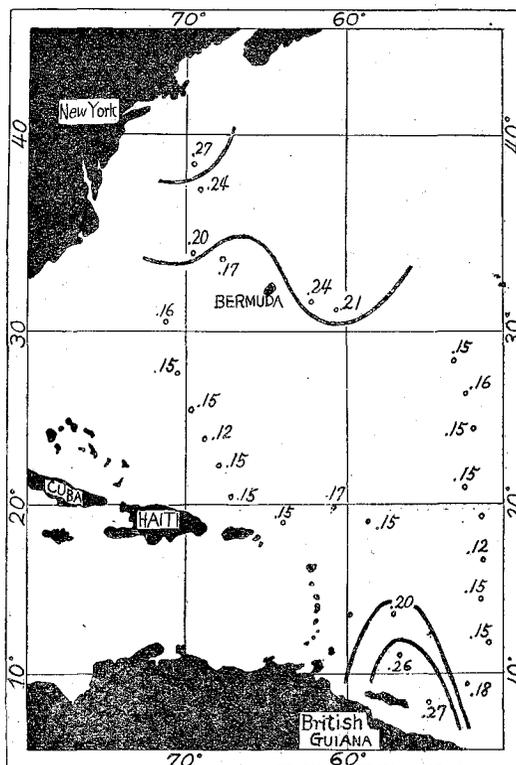


Fig. 6. Distribution of a computed from the records in Southwestern section of the North Atlantic Ocean (G. L. CLARK 1941.) Nos. show the Value of a .



ように、塩分分布と可成りよく適合し^{*}、水塊の分布（懸濁粒子の質の差）を示し得ているように思える。海田湾についても同様であり（第5図）、又沖合の例としてはCLARKEの行った西南大西洋の記録⁽³⁾によって図を画くと、St. 542（透明度13m）とst. 543（透明度36m）とは透明度の深さでは非常な差があるが、 a の値は0.26、0.27と略等しく（第6図）、同一性質の懸濁物をもつ水と見做され、又略同様の値の水が北米大陸寄りに見られる。

又英国海峡でのPOOL及びATKINSの記録⁽¹⁾で見るとMewstone附近及びCawsand BayのSt.の値は T が7~72mに亘るが a は0.35~0.55、Eddy stone 沖のSt.では a は0.25~0.35の値を示す。

3. 補償深度と透明度の深さとの関係

植物 planktonの補償深度に於ける照度は大略300lux（300~400lux）とされるが、今その照度（ I_c ）の深さを Z_c とすると

$$I_c = I_0 e^{-\mu Z_c}$$

前節の関係が成立するとすれば、 $\mu T = aT^b$ なる故

$$\mu = aT^{b-1} \quad (4)$$

$$\therefore I_c = I_0 \exp(-aT^{b-1} Z_c) \quad (5)$$

$$\text{即ち } Z_c = \frac{\log I_0 - \log I_c}{\log e \cdot a} T^{0.3} \quad (6)$$

$$\text{又 } Z_c/T = \frac{\log I_0 - \log I_c}{\log e \cdot a} T^{-0.7} \quad (7)$$

従って補償深度も、又補償深度は透明度深の何倍かというよく使はれる値も、 a 及び T の大きさ如何に関係することであって、そのまま一概に比較することは意味をなさないわけである。 a が一定の水塊中でも、 T が大になる程 Z_c/T は小さくなる。

4. 1日補償深度について

300~400lux 附近の照度下では同化作用の大きさと光量（Energyで）は直線関係にあることが知られているから、 $300 \text{ lux} \times 24 = 7,200 \text{ lux}\cdot\text{h}$ を1日間の総補償照度と考えることが出来よう。而して従来の記録のうち、沿岸の透明度の低い水域での平均値をとって $5,800 \text{ lux}\cdot\text{h} = 1 \text{ gr cal/cm}^2$ ⁽⁷⁾とすると、上の値は約 1.24 g cal/cm^2 となる。

空中輻射量 J_A は水面で反射されて減少し、水面下では $(1-\alpha)J_A$ （但し α は海面での反射率）となるが、更に極く表層で特に大きい消散係数を以て減衰する。即ち J_A は反射の為に水面に入ると共に $J_W = (1-\alpha)J_A$ となり、表層（約1m）で更に減光して、それより以下の深層では J_e の強さの光が入射したのと同様の効率となる。SUERDRUP⁽⁸⁾（1953）によると $J_W - J_e$ の大きさは J_W の約80%に相当するという。今此の値を用うると Z_m の深さでの輻射量は $0.2(1-\alpha)J_A e^{-\mu Z}$ と考えられる。之は時刻と共に変化する故、1日間の累積は

$$\int_{1日} 0.2(1-\alpha)J_A e^{-\mu Z}$$

α は1日平均をとることになると上式は

となる。 $\int_{1日} J_A$ は各地気象台で全天水平面日射量（ J_R ）として知りうる。又 $\alpha=0.1$ とすると、1日補償深度 Z_{cd} は

$$0.18J_R e^{-\mu Z_{cd}} = 1.24 \quad (8)$$

$$\text{即ち } Z_{cd} = \frac{\log 0.18 J_R - 0.093}{\log e \cdot a} T^{0.3} \quad (9)$$

で与えられる。

* 透明度の深さが2m以下に濁るような場合の懸濁物はその化学的組成に於て通常の海の濁りを成す懸濁物とは可成り異なる場合があり、又必ずしもCl%と相関があるとは限らない、之については別に報告する予定。

今東京湾の記録について之を計算すると第1表 Z_{cd} 欄の値を得る。

5. 摘 要

従来 $\mu T = \text{const.}$ (μ : 消散係数, T : 透明度の深さ) から海の生産層の厚さ其他の計算がなされているが、水中に懸濁する粒子の種類又は組成によって水塊の光学的性質が相違し、この関係も一様ではないと推定される。著者等の実測其他の記録から見ると、 T での照度 I_T は $I_T = I_0 \exp(-aT^b)$ (I_0 は表面照度) の形をとると考えられ、且 $b = 0.7$, a は大略、洪水による出水時で2, 湾内水で1~0.4, 沖合水で0.4~0.1の範囲であり、或水域の a の値の分布はCl%の分布の如き海洋学的性質と可成りよく一致する。

又之等の式を使って、植物 plankton の補償深度, 1日補償深度を近似的に求めた。

終りに種々有益な御忠告を戴いた菱田耕造氏に深謝申上げる。

参 考 文 献

- 1) H. H. POOL. & W. R. G. ATKINS: Photoelectric Measurement of submarine illumination throughout the year. J. Mar. Biol. Assoc. Vol. XVI., No. 1, 297~324 (1939)
- 2) " : On the penetration of light into sea water. J. M. B. A. Vol. 14. (1926)
- 3) G. L. CLARKE: Light penetration in the Caribbean Sea and in the Gulf of Mexico. J. Mar. Res. Vol. 1. No. 2 25~94 (1937)
- 4) " : Observation. on transparency in the SE section on the North Atlantic Ocean. J. Mar. Res. Vol. 4, No. 3. 221~230, (1941)
- 5) 花岡 資: 内湾生産力の標示について 内水研報告 1. (1952)
- 6) 生産力調査要報 No. 5, No. 6, 東海区水研 (1949)
- 7) N. G. JERLOV: Optical studies of Ocean Waters. Rep. Swedish Deep Sea Exp. Vol. III, Physics & Chem. No. 1 3~59 (1951)
- 8) SVERDRUP et al: The Ocean (1948)
- 9) H. U. SVERDRUP: On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. J. d. Cons. Vol. XV III, No. 3, (1953)