

海水中の濁りと明るさ

菱 田 耕 造

まえがき

今から40年前、客船でハワイを経てサンフランシスコまで太平洋を渡った時、海の美しさと透明さは夜のきれいな星空と夜光虫の発光とともに、今も本当に素晴らしく思い起す。その翌年、はじめて観測船で日本南海の黒潮流域で水色・透明度を測定した。その後、潜水船の色はどのような色がよいのか、航空機からどの程度見えるのかなどの課題に出合った。

終戦後、日本海の海岸漂砂や堆積が鳥取県をはじめとして調査研究の対象となり、私も参加したのであるが、海底付近を浮遊する砂の動きを現場で把握するために、光を用いようと試みたが、よい成果は期待できなかった。その頃、海中の光の研究には結局海水の濁りの実態をつかむことが、特に沿岸では先決であると考えていたのであるが、光は砂のような大きな粒子でなく、浮遊しているような小さい粒子を対象とすれば有用であることを体得した。元来、海の光の問題は物理学的な興味と水産生物への応用とから出発していると考えられるから、若狭湾西部で海水の濁りの性状や時間的・空間的変動について研究を行った。

1960年代に入り、我が国をはじめ先進国に海洋開発の声が起り、海洋工事・海中公園などに関連して、海中の明るさなど光学的な問題が実用上からも浮び上がった。1964年に伊東沖水深20 mの地点に海洋気象観測塔を設置し、海洋気象要素の連続測定に着手したが、ついでに海中の明るさや濁りの変化の測定も加え、その経験を基にして、1967年広島湾で約1ケ年にわたる海水の濁りの連続観測に一応の成果をおさめた。1970年頃からは海洋開発に伴って起る海洋環境保全が重要な問題となり、水質汚濁防止法（昭和45年12月）などを通じ、現実にはその検討がはじめられるようになった。これらに関連して、海水の濁りや明るさについて、ささやかな体験を通して、話しをすすめてゆきたい。本稿の構成は次のとおりである。

- | | |
|---------------------|------------------|
| 1. まえがき | 6. 海洋中における光 |
| 2. 海水の光学的性質 | 7. 水中における見え方 |
| 3. 海水の濁りの原因 | 8. 工事に伴う海水の濁りの変化 |
| 4. 透明度・水色・濁度・SS・透視度 | 9. おわりに |
| 5. 明るさと濁りの光電測定 | |

1. 海水の光学的性質

海水の光学的性質は海洋現場における海中の明るさを理解するために十分知っておく必要があり、また海水の濁りを表わす重要な手段である光学的手法に不可欠なものである。平行度が非常によい単色の光束を海水中に投射し、他からの光が入らないようにして光束の分布状態を測定すれば海水の光学的性質が一応はつかめる。

光束が海水中に入射すると、吸収と散乱の2つの過程によって消散してゆく。吸収は熱エネルギーなどに変換される非可逆的過程を伴うが、散乱は光の方向を変化させてゆくだけである。透過した放射束の入射した放射束に対する比を透過率といい、光束の長さにくらべて小さい直径をもつ光束についての透過率を特に光束透過率（beam transmittance）という。（第1図(a)）、吸収のため失われた放射束の入射束に対する比を吸収率といい、光束に垂直な媒体の非常にうすい層内の吸収率 A/A をその

厚さ Δr でわった値 $a = -\Delta A / \Delta r$ を吸収係数 (absorption coefficient) という。光の散乱は吸収にくらべ方向性があるから複雑になる。粒径が波長の約 1/20 以下の粒子であれば、分子散乱としてレーレー散乱 (Rayleigh scattering) がなりたち、 θ 方向の強さは $(1 + \cos^2 \theta) / \lambda^4$ に比例する。ここに λ は光の波長 (nm) である。(第 1 図(b))。粒子が大きくなると、ミー散乱 (Mie scattering) が適用される。この場合には体積散乱関数 (Volume scattering function) $\beta(\theta)$ を考える。これは与えられた方向中の体積要素からの散乱光の強さ $dI(\theta)$ を散乱体積 dV 上の照度と単位体積の積でわったものであって、半径 r の N 箇の粒子がお互いに独立して、ある程度離れているとき、

$$\beta(\theta) = dI(\theta) / EdV = \pi r^2 N i_\theta$$

で与えられる。ここに i_θ は 1 箇の粒子の幾何学的断面に入射する単位面積あたりの光束によって θ 方向に散乱される光束の強さであり、

$$i_\theta = (i_1 + i_2) / 2\pi\alpha^2, \quad \alpha = 2\pi r / \lambda$$

である。式中 i_1 および i_2 はそれぞれ入射光と散乱光の伝播方向を含む面に垂直な方向および平行な方向に振動する強さに関するものである。 i_1, i_2 は α, θ および屈折率 n の 3 つの変数に関係する量であるが、大変複雑であるからここには省略する。第 2 図に体積散乱関数の一例を示す。

θ のすべての方向で $\beta(\theta)$ を積分すれば全散乱係数 (total scattering coefficient) が求められる。

$$b = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin \theta d\theta = \pi r^2 N K$$

$$\text{式中 } K = 2\pi \int_0^\pi i_\theta \sin \theta d\theta = \frac{1}{\alpha^2} \int_0^\pi (i_1 + i_2) \sin \theta d\theta$$

は有効断面係数とよばれ、第 3 図に K と α の関係を示す。波長を一定とすれば粒径が小さい場合は粒径とともに急増し、その後減少して振動しながら 2.0 という一定値に近づいてゆく。

消散に関しては消散係数 (attenuation coefficient) が用いられる。

これは光束に垂直な媒体の非常に薄い層の中の消散率 c (吸収率と散乱率の和) をその層の厚さ Δr でわったもので

$$c = -\Delta C / \Delta r$$

で示され、単位はふつう m^{-1} である。長さ r の均一媒体については

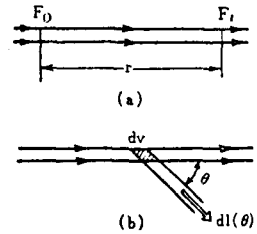
$$cr = -\log_e (1 - C)$$

がなりたつ。ここに c は消散率であり、 $c = a + b$ である。入射光束を F_0 、光路長 r における光束を F とすると

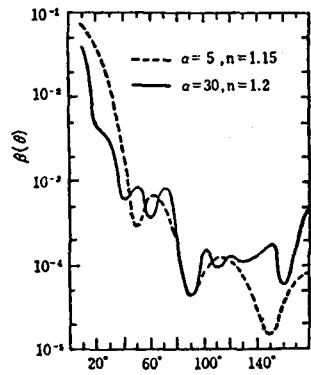
$$F = F_0 e^{-cr}$$

2. 海水の濁りの原因

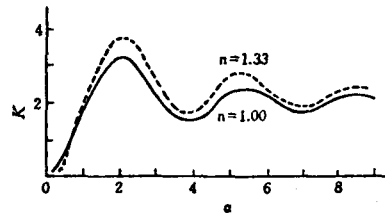
海水が純水と違っている点は、誰でも知っているように塩分である。海洋に関する問題のうち、波浪、海流、潮流など水の運動を論ずる場合には、密度流を除いては一般に塩分は問題にならない。海況すなわち海水の性質が海によって異なることを知るためには、海水の塩分が場所的にも時間的にも変



第 1 図 光束の透過と散乱



第 2 図 体積散乱関数



第 3 図 有効断面係数 K (n : 屈折率)

化しており、ごくわずかな差でも精密に分析し、その量を問題にしている。さらにごくわずかな量しか含まれていないような海水中の栄養塩類は海中の生物に大きな役割をもつとともに、またこの量の分布から海況を知るということにも利用される。

このような海水に溶けこんでいるものばかりでなく、いわゆる分散相として海水中に存在するものがある。分散相が海中では気体状か固体状にわかれるが、泡沫や酸素のような気体状は別として固体の物質が問題になる。

元来、濁りというものは、肉眼で見て判断することが多い。従って海水の濁りを海の中の光の問題に関連して論ずる場合が多い。いま海水中の溶存物質と懸濁物質によって海水の光学的な清澄さが損われている状態として海水の濁りを考えることとすると、その原因となる物質が生じる源は、産業排水、雨水及び河川水、固形廃棄物や浚渫、埋立などの工事による土砂の攪拌などが考えられる他、暴風雨時の波、流れによる海底、磯などの物質の巻き上げなどがある。

海水の濁りの原因となる物質を分類して見ると、有機物、無機物および溶存物質、懸濁物質になる。

- (1) 無機溶存物質 主に塩分であるが、一般に濁りとほとんど関係ないことが理論的にも実験的にも認められている。塩分の小さい場合濁りが大きいという結果が見られることが多いが、これは陸水の濁りが海中に入って海水の濁りを大きくするためであって、塩分と濁りの直接的な結び付きではない。
- (2) 有機溶存物質 水溶性の腐食物質で黄色より短い波長の光をより強く吸収するので、濁りに関係する。黄色物質 (yellow substance) として北欧などで古くから知られているが、日本近海にはそれほど多くはないと思う。ただし沿岸水や内湾水などでは、無視できない。
- (3) 無機懸濁物質 砂、粘土、Al, Si, Fe などである。陸水や風によって海に入る。
- (4) 有機懸濁物質 植物プランクトン、動物プランクトン、バクテリアなどの生物質および生物の分解生成物 (デトリタス detritus) などである。

懸濁物質はこれらさまざまなものの凝集体 (organic aggregate) の形をとる場合もある。懸濁物質をセストン (seston) と呼ぶことがある。

濁りの程度を光束消散係数で表わすとする、水自身、懸濁物質および溶存物質による吸収と散乱の和と考えられる。光束消散係数を c とすると、次式で表わせる。

$$c(\lambda) = c_w(\lambda) + c_p(\lambda) + c_y(w)$$

$$\text{および } c_w = a_w + b_w, \quad c_p = a_p + b_p$$

ここで、 a_w , a_p , a_y はそれぞれ水、懸濁物質、溶存物質の吸収係数で b_w , b_p は水、懸濁物質の散乱係数である。単位は一般に m^{-1} が用いられる。

水そのものについては、消散係数 c_w のうち吸収係数 a_w が大部分をしめ、短波長部を除くと散乱は一般に小さい。水の場合測定値はいくつかの結果があるが、その一例についての c_w と波長の関係を第4図に示す。また水分子に対する散乱係数 b_w は波長の4乗にほぼ逆比例する。

懸濁物質による吸収係数 a_p は鉱物質と有機物によるものの和であるが、鉱物質粒子によるものは非常に小さいものと考えられており、有機物のうちデトリタスによる吸収係数についてはほとんど明らかにされていない。植物プランクトンの光合成色素であるクロロフィルについては第5図に示すように 420 nm 付近に極大をもつような吸収係数が認められている。

懸濁物質による散乱係数 b_p は鉱物質、プランクトンなどそれぞれの懸濁物質の濃度と粒径分布および屈折率を与えることによって求めることができるわけであるが、実際にはそれぞれ別々にそれらの寄与を分離して測定することは大変難しい。

4. 透明度、水色、濁度、SS、透視度

透明度（transparency）とは、海水の清濁の程度を示す一つの標示である。通常透明度板とよぶ直径30cmの白色の平らな円板を海中に降ろし、上から見てこれがちょうど見えなくなる限界の深さを透明度とし、mを単位とする深さでいい表わす。

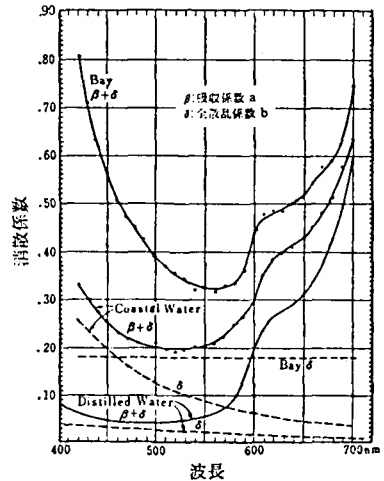
水色（color of sea）とは、白昼海面の真上から望んだときの海水の色である。これを測定するには未だ適法がないので、フォーレルが湖沼の水色を比色法によって決めるために考案したフォーレル水色標準液を海水の場合に利用している。標準液番号は1～11号である。海水の色がかった色を帯びている場合にはウーレの水色標準液を用い、その番号は11～21号であって、11番で両標準液の階級は互いに連けいしている。

透明度、水色は以上のように海洋観測指針でも定義されているが、濁度という言葉は普通常識的に用いられ、未だその定義は定っていない。しかし上水の物理的検査には古くから白陶土のmg/lが濁度の単位として用いられてきた。この際白陶土をどの様に処理するかが問題であって、1936年の上水試験法には白陶土を灼熱して含有する有機物を焼却したのちのものを乳鉢で細粉化して6号（100メッシュ）でふるい分けることになっている。1950年には「飲料水の判定標準とその試験方法」で局方7号ふるい（200メッシュ）による75 μ 以下の細粒が標準になり、1965年にはふるいによる細粒の精製は沈降法に改められた。そのためふるい分けによって得られる粒子よりその径は1/10～1/20に細粒化したことになり、従来の濁度標準値に対し補正が必要となった。

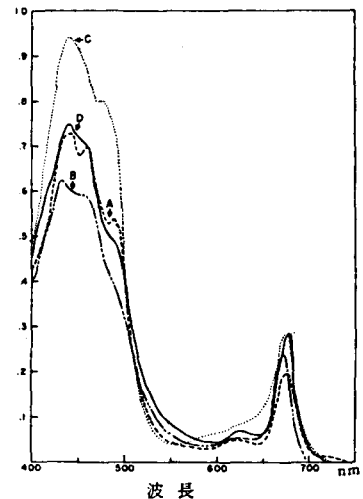
他方、JIS K 0101の規格 8.2.1（1966）に“濁度とは水の濁りの程度を示すもので、精製カオリン1mgを水1ℓに含む場合の濁りを1度（または1ppm）とする”と定義されている。なお色度についても定義され、“水の色の程度を示すもので、塩化白金酸カリウムと塩化コバルトれもって標準液を作り、これの1mlを1ℓにした場合を色度1度とする”とされている。

濁度標準液は精製カオリン1gをメスフラスコ1ℓにとり、これにホルマリン10mgを加え、水で全量を1ℓとし、これを原液とする。精製カオリンはカオリン約10gを共セン付のメスシリンダー1ℓにとり、水を加えて1ℓとし、1分間激しく振り混ぜて水中に分散させ、常温で1時間静置したのち、サイホンを用いて液面から50mmまでの液を捨て、その下150mmまでの液を採取し、これを蒸発乾固し、さらに乳鉢で微粉細し乾燥したものである。検水の濁りは濁度標準液と比較して測定する比色法と透過光または散乱光を用いた光電測定法がある。

SS（懸濁物質）はろ過または遠心分離器によって分離される物質としてJIS K 0102 1971「工場排水試験方法」に規定されていて、suspended solidsの英字略名である。水洗後105～110℃の乾燥器中で2時間乾燥した重さ既知のGFP（glass fiber filter paper）を適当なる過器に固定し、網目2mmのふるいを通した検水の適量（乾燥後のSS量が5mg以上）を注ぎ入れ吸引ろ過し、GFPをとりはずし2時間乾燥した後、懸濁物質のppmを求める。1974年官報で孔径1 μ のGFPを用いることになった。ま



第4図 蒸留水と海水の消散係数 (Hulbert, 1945)



第5図 植物プランクトンの吸収スペクトル

た溶液に含まれる固形物および蒸発残留物について JIS に各種の定義と測定法が定められている。

懸濁粒子の濃度や粒径分布を求めるには、一般にはろ過による方法が用いられる。GFP の他にミリポアフィルター、メンブランフィルターなどのろ紙やガラスフィルター、プランクトンネットなどが用いられ、吸引ろ過し、各粒径毎の重量分布を求める。

また、 74μ のふるいを通過した粒子を分散剤でよく分散させ、オムニコン測定装置により、各粒径毎の個数分布を測定し、統計的に組成分布を求める顕微鏡による測定方法がある。

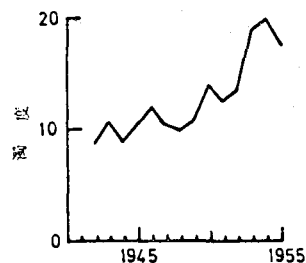
74μ ふるいを通過した粒子を沈降させ、ストークスの法則を用いて、沈降時間と光透過量から各粒径毎の分布を求める透過光による測定方法がある。

なお、懸濁粒子の体積を粒径別に求めることのできるコールタカウンターがある。

また、「JIS K 0102」に透視度が定められている。 30cm のガラス製円筒に試水を満し、上部から透視する。底部のコックから徐々に試水を抜いてゆき、底部においた標識板の二重+字がはじめて明らかに識別できるときの水位をはかり、 1cm を 1 度として表わす。これは原理的には濁度と同じく、透過した光の量を視感的に判別するわけである。この試験は濁りばかりでなく、色や明るさなども入り、個人の視覚や視力による差、測定時の条件による差が誤差となってくる。したがって、できるだけ多くの人によって測定した値の平均を採用するとか、原則として自然光（直射をさけ）のもとで行なうなど注意を要する。

以上、濁りの指標と考えられるもので、後述する光電測定によらないものをいくつか掲げた。これらのうちで長年にわたり使われてきた透明度は今もかなり役立つのであって、例えば、瀬戸内海では 1928 年より 6 ケ年間にわたる透明度の平均は大阪湾の 6m 前後から伊予灘の 12m 前後にまたがり、全平均 8m 程度であったが、1971 年には大阪湾で 4m 程度、伊予灘で 7m 程度と約 40 年間にかなり海水が濁っていることが透明度で端的に示される。

また大阪市の柴島で淀川の水を上水として取水するさいに測定された濁度の日々の値を統計したことがある。1942 年から 1955 年までの資料について年平均を図示すると第 6 図のようになった。濁度は流量にも関係するし、その分布も降雨分布の型と似た非対称形を示しているが、濁度が戦争中および戦後 3 年ぐらいは 10 前後であるのに其後年々増大していく傾向があり、大変興味深かった。



第 6 図 淀川の濁度の変化

5. 明るさと濁りの光電測定

光の照射をうけた物体が、その光のエネルギーを吸収し電気的な変化を起す現象、すなわち光電現象を能率よく実用化した装置には、光起電効果を応用したセレン光電池、シリコン光電池、光導電効果による硫化カドミウム光導電セル (CdS) および光電子放出効果を用いた光電管、光電子増倍管などがあり、それぞれの利点・欠点を知って使いこなす必要がある。また吸収や干渉によってそれを通過する光の大きさや分光分布を変化させるフィルターを光学フィルターといい、相対分光分布を変えることなしに光量を減少させるフィルター (中性フィルター) と分光分布が変化するフィルター (色フィルター) とにわかれる。後者のうちすぐれた特性の単色光は干渉フィルターで得られるが、光量の小さくなる欠点がある。

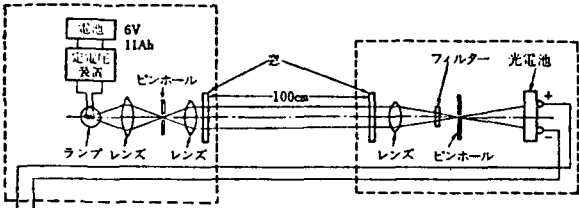
照度の単位としてルクス (lux) が一般に用いられているが、海中ではなるべくルクス単位を用いないで、ワット (watt) を使いたい。 1ルクス はほぼ 1.5 mW/m^2 に相当する。照度の概数は太陽の日向で 10^5 、野外の日蔭、曇天の星光 10^4 、室内で $10 \sim 2000$ 、満月光で 0.2 lux である。

光度の著しい白熱電球でガラスが透明なものとつやけしのものとを比べて見ると、“まぶしさ” ず

なわち眼で見た明るさが違う。この単位はスチルブ (stilb) = cd/cm^2 (cd はカンデラで実用上は従来の燭と同じ) という量が用いられ、輝度である。太陽光 1.5×10^7 , 電球のフィラメント $2 \sim 12 \times 10^2$, つやけし電球30, 目に入る光源の輝度の限界 $0.2 \text{ cd}/\text{cm}^2$ 程度である。

水中の照度を測定するための水中照度計は水密の容器に光电装置を入れ、集光器、中性フィルター、色フィルターなどを備えたもので、船上から上下して迅速に測る。

消散係数を測定する装置を光束透過率計 (beam transmittance meter) といい、白色または分光された平行光束の投射系及び受光器よりなる。現場用と実験室用とあるが、後者では試水を入れる吸収管を必要とする。光路の長さは外洋で 1 m を標準として用いるが、沿岸では 50 cm 以下のものが用いられる。光源からの光はコリメータ・ピンホールを用いて平行光束とし、これが受光部に入るとレンズ・ピンホール式の光学系をへて光電池に達する。(第 7 図) 光源の変動をなるべく小さくする必要があり、また前方散乱光が混入しないようにする。空気を標準として消散係数を求める場合には補正を忘れないで行う。現場用は一波長でもかなり高価になるが、海の現場で測ることが望ましい。多波長を船上から遠隔操作できるものを開発中である。

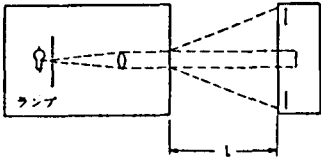


第 7 図 光束透過率計の光学系

濁度計で透過光方式で市販されているものは光束透過率計の簡便なもので、使用する際には光束の平行性、前方散乱光が受光部に混入しないもの、光量と電流の直線関係など十分吟味する必要がある。また濁度標準としてのカオリンはその精製法が JIS に定められているが、特にカオリンの種類を規定していない。カオリンは産地により比重、白色度、粒度分布が異なり、また精製にさいしての液温がカオリンの粒度分布に関係してくる。また濁度ゼロとして使用する水についてとくに規定されていない。このように濁度標準についていろいろ留意する点が残されている。

散乱光方式のは体積散乱関数の値をすべて求め得るのが望ましいが、手間がかかるし、海中現場用では自然光をさえぎる必要があって、我国では未だ作られていない。ある固定した角度たとえば 30° , 45° , 90° などの散乱光を求めるものが多く用いられている。なお、レーザー光 (632.8 nm) を用いて透過光 (光路長 1 m) と 45° , 90° , 135° の 3 方向の散乱光とを同時に求める曳航可能な装置が電子総研で作られた。

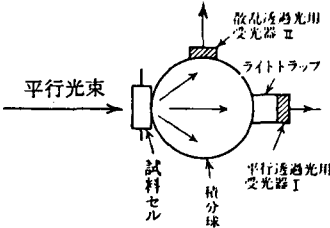
散乱光・透過光方式は散乱光と透過光の比が濁度に比例することを用いている。一定期間透過率計を海水中に連続してつけたまま観測する場合に、ガラスの汚れが光源部、受光部ともに起ることが障害であり、これを防ぐための適当な手段が欠けている。筆者はドーナツ型の光電池を用い、透過光の他に前方散乱光を測定できるようにした自動測定計を作り、広島湾で 1 年近くの連続測定を行った。(第 8 図)



第 8 図 透過光・散乱光方式濁度計

また、積分球を用い、試水による散乱光と透過光との比を求め、この値を濁度標準液の示す散乱光と透過光との比と比較して濁度を求める積分球方式のものを第 9 図に示す。光源からの平行光束を試料セル中の海水に投射すると、平行のまま進む光は積分球のライトトラップの先端についた受光器 I に入り、また散乱された光は積分球に入って入射方向とは無関係に受光器 II に入る。

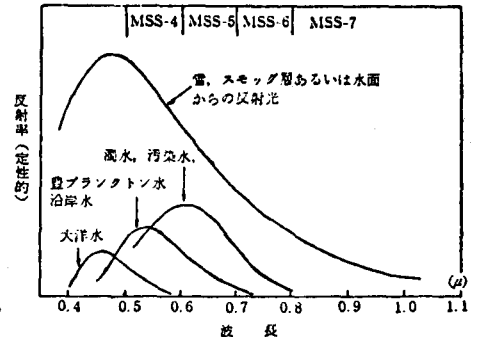
光のかわりに超音波を用いて懸濁物質の測定をしようとする試みが、東海大学の西村、土屋両氏により行われてきた。これは水面から垂直に超音波を発射して、海水中的の懸濁物質とくに浮遊泥層で反射した超



第 9 図 積分球方式濁度計

音波の記録のパターンから、その濃度や粒径分布などを判定しようとするものである。水中音速は浮遊泥の濃度がますます高くなって減少する傾向があり、音波の吸収値は濁度の分布に関係があることが認められている。光による方法と超音波法による方法とを併用すればよいと考えられる。

近年航空写真によって濁りをとらえる方法が広水域にわたって同時性の高い資料が得られ、しかも繰返し観測が容易に行えるために考えられている。写真に写し出された目視による濁りの範囲を求めることは比較的容易であるが、カラー写真をとって写真濃度計によって分析したり、さらに複数の波長帯にわけて受感するマルチスペクトルカメラやマルチスペクトル走査計により一層正確な情報を得る方法が開発されつつある。この場合、水中情報を担っている水中光のうち上方に向う光のスペクトル分布をできるだけ歪めないで上空のセンサーにとらえる必要がある。第10図は水中からの上方向の光についてスペクトルの形を定性的に示したもので、水中光には近赤外部成分はほとんどないが、空中情報からの光には近赤外部が含まれていて、そのスペクトルの形は図のように太陽光のスペクトルに似た形である。図の上縁に示すMSS-4(緑色、 $0.5 \sim 0.6 \mu$)、MSS(オレンジ、 $0.6 \sim 0.7 \mu$)、MSS-6(暗赤色、 $0.7 \sim 0.8 \mu$)、MSS-7(近赤外部、 $0.8 \sim 1.1 \mu$)の4つのバンドにおけるシグナルのうち、MSS-7には水中光は含まれていないから、MSS-4やMSS-5のように水中光と空中情報を含むものと比較すれば、水中光の情報を分離抽出することができる。またMSS-4の画像はMSS-5の画像よりも水中数mまでの濁水情報を含んでいる。



第10図 水中光と反射光のスペクトル

このように、カラー画像をうまく使えばかなりよい水中情報が得られるが、航空機などのリモートセンシングでは透明度の示す深さまでぐらいいのこしかできない。また天気状況と太陽光の条件による天空光の研究、波浪による太陽光の海面における反射の研究などを十分行う必要がある。

6. 海洋中における光

海洋現場では光はその方向がさまざまであるから、放射輝度 (Radiance) と放射照度 (Irradiance) とを区別する必要がある。前者は単位投射面積、単位立体角あたりの放射束であり、後者は考えている点を含む表面上の微小部分に入射する放射束をその部分の面積でわったものである。太陽光や空光は海面で反射と屈折をうけ海中に入る。海中を伝播する場合吸収と散乱の影響を受ける。これらの現象を厳密に考えると大変面倒なことになる。簡単に考えて、海水中で光が深くなるにつれて弱まってゆく程度を示すために、深さ z における水平面の上面の微小部分上の光束をその部分の面積でわったものを E_u として

$$K_u = - \frac{1}{E_u} \frac{dE_u}{dz}$$

で得られる K の値を用いる場合が多い。この K を消衰係数 (attenuation coefficient) とよぶ。これを消散係数 (extinction coefficient) とよぶ場合もある。海水の光学的性質にのべた光束透過率とは式の形は同じであるが、値は異ってくることに注意する必要がある。

海水中の照度を左右する太陽や空からのエネルギースペクトルは第11図に示すように、まず表層では海水によって長波長部は吸収され熱に変わり、海水中に入射してゆくにつれて、次第に変化をうける。大洋の海水を I, IA, IB, II, III, に沿岸の海水を 1 ~ 9 の9種類に分類した光学的水型にわけて、

透過率のスペクトルおよび特定の波長における照度垂直分布を図示したものが第12図と第13図である。

透明度板は海水が垂直的に一様でない場合には使えない。水中照度計によって照度の垂直分布をはかれば、海水の濁りの成層状態は明らかになる。水中濁度計を用いなくてもよいが、両者による値の相違は十分理解しておかねばならない。水中照度計で得られる消衰係数は次式から計算される。

$$K_u = \frac{\log_{10} I_1 - \log_{10} I_2}{Z_2 - Z_1} \times 2.303$$

ここに深さ Z_1 における強さを I_1 、深さ Z_2 における強さを I_2 とする。深さはm単位で測るから K_u の単位は m^{-1} である。透明度を D としたとき $K_u D = 1.7$ という値がよく用いられるが、右辺の数字は 1.0 ~ 1.7 ぐらいと海域により異なるから注意を要する。

海面からでる水中光は水色、航空写真などと関係する。下方に面した水平面における上方向照度と上方に面した水平面における下方向照度の比は、清澄な水では水分子の散乱により青色で6%に達することがあるが、濁った海水では長波長での照度比の方が大きくなっていく。これは粒子散乱の影響が大きくなるためであって、沿岸水では特にそうであるが、10%ぐらいまでに止る。水色は上方向に向う光が海面からでたときの光のスペクトルが示す色であるから、この照度比は水色と関係が深い。

以上のように、陸上にくらべて、垂直方向に照度の変化が大きく、またスペクトルによって程度も異なるし、上方に向う照度が下方に向う照度にくらべてごく小さいことなどは海中の明るさを考える上に大変重要なことである。なお空光も偏光状態にあるとはいえるが、海中では海面を通過する際や散乱によって一般に光は偏光される。

7. 水中における見え方

物の見え方を左右する主な条件としては、明るさ、コントラスト、物の大きさ、物の動きなどがある。

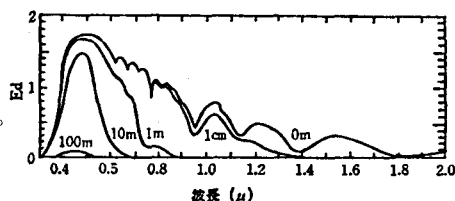
水中の光の損失は空気中にくらべてはるかに大きいし、また垂直方向には海洋現場では光量やスペクトルがかなり変化するから、陸上で物体を霧を通して見えるか見えないかという場合と似ている。しかし傾いた方向に視線を向けた場合は大気中とははるかに異った状態にある。コントラストについて考えると、一般に

$$C = (B_t - B_b) / B_b \quad (1)$$

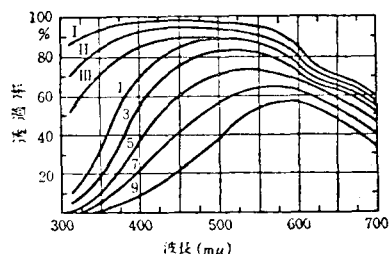
によって定義される。ここに B_t は物体の見かけの輝度、 B_b は背景の輝度であって、 C は理想的黒体では -1、理想的に黒い背景に対して見た物体では ∞ である。物体から r の距離における見かけの輝度は物体からの直接の光によるものと、受光部、目標物間の輝度 $B_p(r)$ の和である。(第14図) 前者は $r=0$ のときの輝度 $B_t(0)$ が消散係数 c で r とともに減るとすると、受光器における輝度 $B_t(r)$ は

$$B_t(r) = e^{-cr} B_t(0) + B_p(r)$$

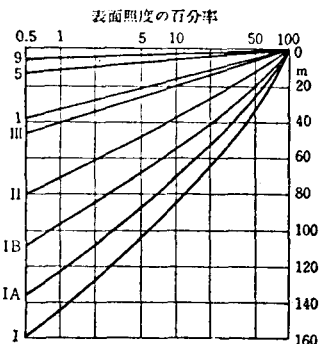
となる。背景の輝度 $B_b(r)$ は海により異なるが、簡単に考えて



第11図 下方向照度スペクトル(深度別)



第12図 各水型における透過率スペクトル



第13図 各水型における照度垂直分布(波長 465 mμ)

$$B_b(r) = e^{-cr} B_b(0) + B_p(r)$$

とかくことにする。また

$$B_b(r) = B_b(0) e^{-(K \cos \theta)r}$$

ここに、 K は拡散光に対する消散係数、 θ は物体の方向の天頂角とする。この3式から C は次式で得られる。

$$C(r) = C(0) e^{-r(c - K \cos \theta)}$$

$$\text{ここに } C(0) = (B_t(0) - B_b(0)) / B_b(0)$$

このように見かけのコントラストは物体からの直接の光と同じように指数的に減るが、 c でなくて $(c - K \cos \theta)$ である。この値は K を $0.3 \sim 0.5 c$ とすると $0.5 c \sim 1.5 c$ の間で変化することになる。

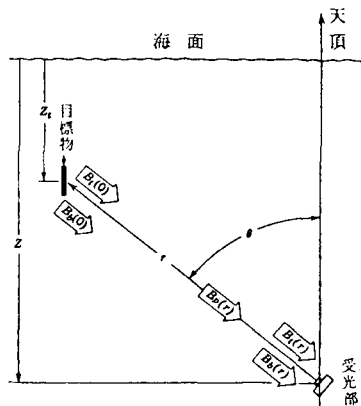
第15図に $c = 0.39$ 、 $K = 0.18 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ と仮定したときのコントラストと物体、受光器の距離との関係を示す。黒い物体では上向きに見るとき($\theta = 0$)に視認距離は最大になり、下方に見るときに最小になる。これに対し白い物体ではコントラストは視角により交差するから、ある視角でいつも他の視角のときより大きいとはいえない。比較的写真を近づいて撮ることが多いから、上方に見るよりも水平または下方に見る場合にコントラストはよい。しかしコントラストが小さい場合には逆に上方に見る方が視認距離はよくなる。黒い物体の輝度は0であるから、コントラストは-1であり、白い物体で上方に見るとコントラストは-1に近づくから、上方に見た場合白黒は区別し難い。

以上のように水中では微粒子による光の散乱が影響するから、いわゆる光幕現象が起る。これは物のコントラストを著しく低下させ、物の輪かくなどを薄くして物を見えなくする。照明光を強くすれば光幕も著しくなるから、水中写真ではコントラストは重要な課題の一つであって、目的物に比較的接近して補助光源をおくとか、偏光を用いるとかいろいろな工夫が必要である。

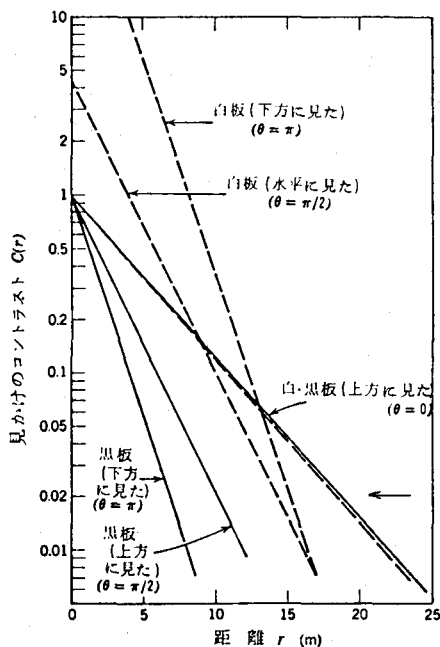
物の大きさはいわゆる視角の大小によって見え方が左右されるが、視角に関しては水中眼鏡で物を見る場合は水の屈折率が関係するので水中では約1.3倍に拡大されて見える。つまり水中では同じ距離でも空気中の約1.3倍物が大きく見える。なお空気中から波のある水中を見る場合は水中の物がゆらめき、形がゆがみ、あるいは物がちぎれて見えたりする。水面の反射光も関係する。

8. 工事に伴う海水の濁りの変化

海洋開発がとりあげられるようになって、海中工事や海中公園などと関連して、海水の濁りや海中



第14図 コントラストの計算



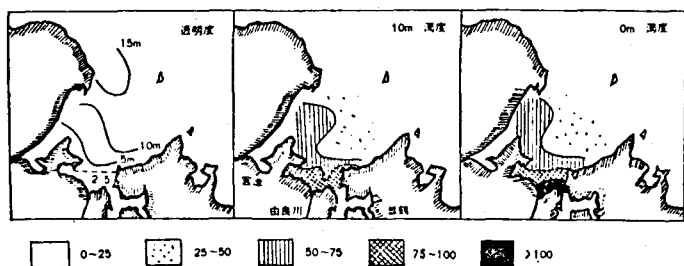
第15図 コントラストと距離の関係

の明るさなど海洋光学的な課題の解決が急にクローズアップされた。さらにその後数年経って海洋開発に伴う海洋環境の保全の重要性が叫ばれるようになり、今や環境保全が海洋開発に優先する時期に至った。

さて海洋の汚濁や汚染がいろいろな形をとって日本の沿岸海域で進行しつつあることは申すまでもないが、土木工事においては特に浚渫・埋立あるいは海洋構造物の建設工事に伴って起る海水の濁りや海中の視環境の悪化はその一つの重要な対象課題である。また河川の沿岸域への流入がその付近の漁業活動に影響を与える問題も田子の浦港などに端を発した大きな課題となっている。例えば島根県の斐伊川の水を神戸川に分流する場合大社湾における漁業に及ぼす環境事前評価などその一例である。

工事に伴う海水の濁りの変化を知るためにはやはり事前調査、モニタリング、事後調査を行う必要があることは他の場合と同様であり、また単に漁業補償のための資料となればよいというのではなく、一方学問的興味で行われるのでもないことも明らかである。

事前調査にあたっては、先づバックグラウンド値の観測調査が重要であるが、海水の濁りをその現場に応じ適切に表現できるような指標をもとめ、定量的に表現することが先決である。海水の濁りを光と結びつけて表わす方法は幾多の問題が未解決に残されているとはいえ簡便な方法であり、1952年若狭湾西部で行った例を掲げる。すなわち1～2 湊間隔で格子状にきめた26の観測点で数層にわたり海水の濁度を測定した結果のうち、表面と水深10 mの水平分布を第16図に示す。ここでは濁度として100 mあたりの光の消散係数を採用した。透明度と比較すると、由良川より流出する陸水が海洋に入る海域では表面濁度が大きくよくあっている。10 m 層では海水の濁度は小さく、底の方まで陸水が及ばないことがわかる。ついでに河

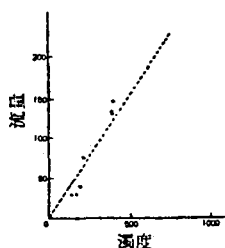


第16図 丹後湾における濁りの分布

口4 kmの地点における河水濁度はをはかり、同時に流量を正確に測った十数回の結果を第17図に示す。波浪や潮流、風による流れなどのほか、河川の流量によっても河口付近の濁りは左右されるから、いろいろな場合を考えて調査を行う必要がある。

また観測調査にあたっては、沿岸海洋構造あるいは過程について把握し、後でのべる水理実験や数値計算などにも役立つように計画する必要がある。

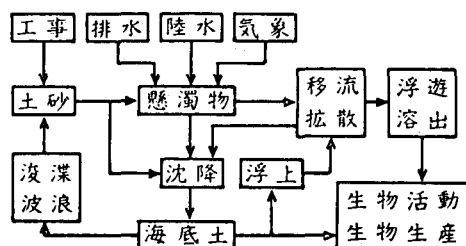
例えば、混合拡散過程には時間的・空間的にいろいろなスケールの現象が沿岸海域に存在することに留意して、水平・鉛直方向の渦動拡散率を求めるようにしなければならない。さらに潮流に関しても、15日以上での観測が容易に行われるようになったのであるが、このような連続測定結果から得られた潮流の調和常数がどの程度の意味をもつか、風の影響をどのように評価し、海流をどう考えるか、あるいは流速計の種類や繫留方法によりどの程度影響されるのかなど十分吟味する必要がある。特に外洋沿岸では気象条件による影響が大きいから、調和分解だけですまされるものではない。なお海水の濁りに関係する水質についても、測定者や分析方法、機器の差異などが長期間にわたってかわらないことが望ましい。また現在ある法令や規準で定める項目を確実にを行う他、留意すべき事柄は多々ある。



第17図 濁りと流量の関係

実際に工事を実施する場合に埋立土砂あるいは海底土砂がどのように濁りを発生させ、またどのように動いてゆくかは予め現地実験によって検討しておく必要がある。第18図に簡単に示すように、土

砂は海中に懸濁してから、沈降するものもあれば浮遊するものもある。その粒度組成、沈降特性、比重など土砂の性質によって左右される。埋立の際は土運船が余水吐により、また浚渫の際はその方式により濁りの発生量が異なる。すなわちグラブポンプ・ドラグなど浚渫の種類や浚渫速度、機械の能力、浚渫時間、浚渫土量などが関係することは申すまでもない。また、濁りの動きを規定する



第18図 海水の濁りの動き

ものはその海域の移流、波浪、乱流、水深、海底形状、水温、塩分などである。沈降のおそい微細粒子は長時間懸濁し浮遊する。これは視環境の悪化や光量の低下に伴う光合成の阻害など生物への影響が考えられる。土砂は沈降する際、溶存有機物や栄養塩などを吸着して沈む。浮遊する細かい粒子も溶存有機物や懸濁物に付着して沈積することがある。また浮遊する粒子から栄養塩などが溶出するなど水質の変化を起すことがある。このために沈降試験・溶出試験やAGP (Algal Growth Potential) 試験などが行われる。

懸濁物質の移流や拡散などの問題については、他の研究分野と同じように、現地調査のはかに水理模型実験や数値実験あるいは数値シミュレーションなどが行われる。これらは基礎的な現象の理論解析と相いまって有効である。このうち模型実験は従来用いられてきたが、要求される精度が高まるにつれて解決すべき課題が残されている。移流、拡散について、縮尺・相似性・起潮機・計測器などに関し、多くの検討を必要とすることはもちろんであるが、さらに風や密度差による影響などどのようにとり入れるか、また水理模型実験による拡散予測がどの程度役立つかなどかなり問題があろう。また、トレーサーとしてローダミンなどのような沈降しないものが考えられるが、新しいトレーサー、例えばセリサイト、ガラスビーズ、カオリン、水素の気泡などについても、その比重、粒径、沈降速度、乱れ、屈折率などの相違のために山土やヘドロのようなものの挙動や光学的特性とどのように異なるかなどの検討が望ましい。

数値解析あるいは数値シミュレーションは水理模型実験を補う意味で用いられ始めたが、その規模が大型化されるようになり、今や数値解析と模型実験とが肩をならべ、統一的にこれを使用しようとする現状である。この問題についても全く同じである。数値解析にあたっては渦動粘性係数あるいは渦動拡散係数を現場に応じた適当な値を採用することは望ましいが、さらに海底摩擦係数をどのように評価するか、あるいは実際の海中で特に夏場に起る温度躍層の表現をどうするか、海上の風の影響をどのようにとり入れるか、基本的な課題が山積している。また計算にあたってはどのような方法が最も効果的であるか、すなわち完全に解くことは望ましいとはいえ、いろいろな仮定を設け簡単化するなど計算技術上の手法の開発が残されている。

最後に、事後調査は事前調査にもまして大切であることを銘記したい。施設の設計、運営などへのフィードバックがはじめて可能になるからである。またモニタリングも適当な方法を開発して、効果的に行うことを考慮しておく必要がある。

9. おわりに

海水の濁りに関する基本的な問題にふれたが、色は濁りや明るさに関連して重要な課題であるにもかかわらず紙面の都合上省いた。また、工事などに伴う実際のデータを紹介し、実用に供するようにと考えたが、標準的なモデルとなるような資料が今のところ見つからないので、皆様の御協力を得て今後その方向に努力したい。なお、生物や化学の問題が重要であるが、専門外であるので省いた。

参考文献は多々あるが、海洋光学としてここには

「海洋中の光の伝播」海洋物理Ⅰ，第４章，東海大学出版会（１９７０）

「海洋光の測定」海洋測定法，第４章，東京大学出版会（１９７２）

菱田耕造：海水の濁りに関する研究，日本海洋学会誌 9（１９５３）
に止めたい。