

17. 高懸濁物濃度の海水の光学特性 (第4報) —生物性懸濁物と非生物性懸濁物の光学的特性の比較—

佐々木保徳*¹ 宗山 敬*¹

本研究では、Kubelka - Munk の二流理論を応用して、海水の吸収係数と散乱係数等を測定し、さらに透過率の計算値を求め、実測値と比較した。この理論は、散乱が強い系ほどよくあてはまるので、本研究では比較的懸濁物濃度の高い海水を使用した。実験には生物性懸濁物に富む海水として赤潮海水、非生物性懸濁物に富む海水として、海底堆積物の巻上りによって生じた汚濁海水の2種類を供した。

両海水の吸収係数、散乱係数の測定は、さきに報告した絶対二値決定法によった。

吸収係数、散乱係数ともに、生物性懸濁物に富む海水では強い波長特性を示したが、非生物性懸濁物に富む海水では認められなかった。

これらの特性は、透過率にも大きく反映している。また、透過率の計算値の曲線は、実測値の曲線と酷似した傾向を示した。透過率の計算値は吸収係数や散乱係数等のわずかな変動を大きく反映し、計算値と実測値とを比較することは、これらのパラメーターの値の妥当性チェックのための一方法と考えてよい。

Optical Properties of Seawater with High Concentrations Suspended Solids (Report 4), Comparison of Optical Properties of Suspended Biological and Non-Biological Solids

Yasunori Sasaki*², Kei Muneyama*²

By applying Kubelka-Munk's two flows theory, absorption coefficients and scattering coefficients were measured. The theoretical values of transmittance were calculated from these two parameters and Kubelka-Munk's two parameters for comparison with the measured ones.

Since Kubelka-Munk's two flows theory can be suitably applied to the intensely scattering turbid medium, seawater with comparatively high concentrations of suspended solids were used for samples.

Two types of seawater were used. One, was abundant in suspended biological solids (mainly phytoplankton), and the other in suspended non-biological solids (caused by the resuspension of sediment).

Two coefficient were determined according to the Absolute Two

*¹ 海洋保全技術部

*² Marine Environment Department

Constants Solution Method referred to in the 2nd report. Both the scattering coefficients and absorption coefficients showed a high dependency on wavelength in the case of phytoplankton-rich seawater, but not in the case of seawater abundant in inorganic suspended solids.

These optical properties also affected transmittance. Profiles of the calculated values of transmittance are closely analogous to that of the measured ones in their shapes. Even a little variation in these two coefficients were so largely reflected in the calculated transmittance values that it may be one of the better ways to confirm the validity of these two coefficients in order to compare the calculated values of transmittance with the measured ones.

1. まえがき

海水中の懸濁物は大別すると、生物性懸濁物と非生物性懸濁物とに分けられる。両者の光学的挙動が異なることは、今や通念となっているが、実際に両者の光学的性質が比較された例をまだ見ない。特に沿岸域のように、多種多様な懸濁物が存在するところでは、懸濁物の基本的な光学的性質を把握することは、光学的に海洋にアプローチする上で不可欠である。

この現象を念頭に置き、本研究では生物性懸濁物に富む海水として赤潮海水、非生物性懸濁物に富む海水として海底堆積物の巻上りにより生じた汚濁海水を試水として、両者の光学的性質の比較を行った。光学的性質を比較するにさいしては、光学的パラメーターとして最も代表的な吸収係数、散乱係数および透過率を選んだ。

おのおのの試水につき、得られた吸収係数、散乱係数をもとに、計算で求めた透過率の値を実測した透過率の値と比較した。これは両係数の変動が透過率の計算値にどの程度寄与するかを調べるためである。吸収係数と散乱係数については、それらの値の妥当性の検討が難しく、透過率の計算値と実測値との比較が一つの照査法となれば、今後の研究上、きわめて有効である。

本研究の実施にあたっては、千葉大学工学部、江森康文教授並びに安田嘉純助教授、有効適切なご助言をいただいた。ここに、厚くお礼申し上げる。

2. 理 論

図1に示す Turbid Medium 中の任意の位置 x における仮想反射率 r は、Kubelka-Munk の連

立微分方程式⁹⁾から、次式としてえられる。

$$r = \frac{c \cdot (a + \sqrt{a^2 - 1}) \cdot e^{-2\sqrt{a^2 - 1} \cdot S \cdot x} + (a - \sqrt{a^2 - 1})}{1 + c \cdot e^{-2\sqrt{a^2 - 1} \cdot S \cdot x}} \dots (1)$$

ただし

r ; Turbid Medium 中の任意の位置 x における下向拡散光束強度 i に対する上向拡散光束強度 j の比 j/i , すなわち内部での仮想反射率

x ; Turbid Medium がのっている基盤の表面を原点とし、Turbid Medium の内部へ向かってとる距離

K ; Turbid Medium の吸収係数

S ; Turbid Medium の散乱係数

a ; $(K + S)/S$ によって定義される定数

c ; 積分定数

いま、Turbid Medium がのっている基盤が反射率ゼロの理想的黒体であるとし、そのときの r を R_0 とおくことにする。このとき、 $x = 0$ のとき $R_0 = 0$ という条件から(1)式は、

$$0 = \frac{c \cdot (a + \sqrt{a^2 - 1}) + (a - \sqrt{a^2 - 1})}{1 + c}$$

$$\therefore c = -\frac{a - \sqrt{a^2 - 1}}{a + \sqrt{a^2 - 1}} \dots (2)$$

(2)式を(1)式に代入し、整理すると、

$$R_0 = \frac{1 - e^{-2bSx}}{(a+b) - (a-b) \cdot e^{-2bSx}} \dots (3)$$

となる。

ただし、 $b = \sqrt{a^2 - 1}$ である。

$$(3)式は、\cot h(bSx) = \frac{1 + e^{-2bSx}}{1 - e^{-2bSx}}$$

なる関係を用いると,

$$R_0 = \frac{1}{a + b \cdot \coth h(bSx)} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

理想的黒体上の Turbid Medium 内における下向(基盤方向)拡散光束強度を i_0 , 上向(Turbid Medium の表面方向)拡散光束強度を j_0 とすれば

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{j_0}{R_0} \\ &= j_0 \cdot [a + b \cdot \coth h(bSx)] \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

また, Turbid Medium 内部での上向拡散光束強度の変化の式⁹⁾から,

$$\begin{aligned} d j_0 &= -(S + K) \cdot j_0 \cdot dx + S \cdot i_0 \cdot dx \\ \frac{d j_0}{S \cdot dx} &= -a \cdot j_0 + i_0 \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

(5)式を(6)式に代入すると,

$$\begin{aligned} \frac{d j_0}{S \cdot dx} &= j_0 \cdot b \cdot \coth h(bSx) \\ \frac{d j_0}{j_0} &= bS \cdot \coth h(bSx) \end{aligned}$$

これを積分すると,

$$\begin{aligned} j_0 &= C_1 \cdot b \cdot \sinh(bSx) \\ i_0 &= C_1 \cdot b \cdot [a \cdot \sinh(bSx) + b \cdot \cosh(bSx)] \end{aligned}$$

C_1 ; 積分定数

ここで, Turbid Medium の表面に入射する光束強度を I_0 , 厚さ X の Turbid Medium を通過したのちの光束強度を I とすると,

$$\begin{aligned} I_0 &= [i_0]_{x=X} \\ &= C_1 \cdot b \cdot [a \cdot \sinh(bSx) + b \cdot \cosh(bSx)] \dots\dots\dots(7) \\ I &= [i_0]_{x=0} \\ &= C_1 \cdot b^2 \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

したがって厚さ X の Turbid Medium の透過率 T は, (7)式と(8)式から,

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{b}{a \cdot \sinh(bSx) + b \cdot \cosh(bSx)} \dots\dots\dots(9)$$

となる。

Kubelka-Munk パラメーター a , b , 吸収係数 k および散乱係数 s は, 以下の式によって決定する。

一般に Turbid Medium が任意の反射率 R_0 を

もつ基盤上にあるとすると, (1)式において, $x=0$ のとき $r=R_0$ とおくことにより, 積分定数 C は,

$$C = -\frac{a-b-R_g}{a+b-R_g}$$

となる。これを(1)式に代入し, 整理すると,

$$R = \frac{1-R_g \cdot [a-b \cdot \coth h(bSx)]}{a+b \cdot \coth h(bSx)-R_g} \dots\dots\dots(10)$$

(4)式と(10)式から $\coth h(bSx)$ を消去すると,

$$a = \frac{1}{2} \cdot \left(R + \frac{R_0 - R + R_g}{R_0 \cdot R_g} \right) \dots\dots\dots(11)$$

となる。これにより,

$$b = \sqrt{a^2 - 1} \dots\dots\dots(12)$$

$$S = \frac{1}{bx} \left[\text{Ar coth} \left(\frac{a-R}{b} \right) - \text{Ar coth} \left(\frac{a-R_g}{b} \right) \right] \dots\dots\dots(13)$$

$$K = (a-1) \cdot S \dots\dots\dots(14)$$

として求められる。なお, (13)式は(10)式から得られるものである。

3. 装置および測定方法

本実験では, 反射光および透過光の測定には, 阿部設計製 2702 型分光放射計(輝度計型)を使用した。アンプは阿部設計製対数型一線型両用アンプを対数型として使用した。使用した水槽は内径 25cm, 深さ 60cm の円筒型ガラス水槽で, 外壁にはアルミニウム箔を張付けて使用した。海水の反射率測定用光源には東芝製 500W フラッドランプを 1 個, 透過率測定用光源には近藤電気製プロジェクターランプを 4 個使用した。

また拡散光透過率を測定するため, 水槽底部と光源の間の拡散板を配置した。

Kubelka-Munk パラメーター a , b の決定には, 白色アクリル板(反射率を R_0 とする), および黒色塗料を塗布したアクリル板を使用した。それぞれを 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 および 0.6m の深度に浸漬したときの海水の見掛けの反射率 R および R_0 を測定し, 各深度ごとに, (11)式と(12)式によって両パラメーターを求めた。両基盤とも使用にあたっては, 鏡面反射が生じないように艶消しした。白色アクリル板の反射率を表 1 に示す。また, 黒色塗料を塗布したアクリル板の反射率は 2~3%であったが, ゼロとみなした。な

お、これら基盤および海水の反射率は、光源により照明される硫酸バリウム粉末を塗布した白色板面の輝度を測定し、これを1とし、これに対する比として測定した。なお、この白色板は全波長域に亘り、すべての方向に対して放射輝度係数1と仮定した。

散乱係数 s および吸収係数 k は、 a および b を決定したのち、(13) 式と (14) 式によった。

透過率の計算値は、 a , b , s , k を求めたのち、(9) 式によって求めた。

本実験で使用した試水はいずれも実海水で、昭和54年4月19日および昭和54年4月26日に海洋科学技術センター地先で採取した海水である。前者は植物プランクトンに富む赤潮海水であり、後者は波浪によって海底土が巻上がり汚濁した海水で、透過率を中心とする海水の光学的性質に対する生物性懸濁物と非生物性懸濁物の影響の差を明らかにするには十分であると認められたものである。なお、懸濁物濃度の測定は、いずれの試水とも1ℓを0.45μmのミリポアフィルターで濾過し、その残渣として求めた。両海水ともに6～9ppmであった。このように濃度に幅があるのは、蒸留水による洗浄が十分でないため、海塩が多少残っているためと考えられる。

4. 結果および考察

植物プランクトンに富む海水につき、測定で求めた波長と吸収係数の関係を図2、波長と散乱係数の関係を図3に示す。

吸収係数は短波長側で大きく、徐々に減少し、550nm 付近から620nm 付近まではほぼ一定で最小値となる。これらの吸収は植物プランクトン細胞による吸収と溶存有機物による吸収の和として測定されている。通常、海水中の溶存有機物による可視光域での吸収は短波長側が最大で、550nm で消失し、最大となる波長でも全吸収係数の1/10のオーダーである。このことから、図1における吸収係数は、大部分は植物プランクトン細胞によるものと考えられる。670nm における吸収ピークは、もちろん、クロロフィルを主体とするものによる。

一方、散乱係数では400nm で最大となり、漸減して450nm から650nmの間はほとんど波長特性を示さず、低い一定値をとり、670nmで極大となる。670nm における散乱係数のピークは、

表4 波長別のアクリル白板の反射率
Reflectances of white acryl plate

波 長 Wave-length	アクリル白板の反射率 (Rg) Reflectances of white acryl plate	波 長 Wave-length	アクリル白板の反射率 (Rg) Reflectances of white acryl plate
4 0 0	0.8 5 5	5 6 0	0.9 1 2
4 1 0	0.9 0 4	5 7 0	0.9 1 2
4 2 0	0.9 0 4	5 8 0	0.9 1 2
4 3 0	0.9 1 2	5 9 0	0.9 1 2
4 4 0	0.9 2 0	6 0 0	0.9 1 2
4 5 0	0.9 2 0	6 1 0	0.9 1 2
4 6 0	0.9 3 8	6 2 0	0.9 1 2
4 7 0	0.9 3 8	6 3 0	0.9 1 2
4 8 0	0.9 3 8	6 4 0	0.9 1 2
4 9 0	0.9 2 9	6 5 0	0.9 0 4
5 0 0	0.9 2 0	6 6 0	0.9 0 4
5 1 0	0.9 2 0	6 7 0	0.8 8 7
5 2 0	0.9 2 0	6 8 0	0.9 0 4
5 3 0	0.9 2 0	6 9 0	0.8 9 5
5 4 0	0.9 2 0	7 0 0	0.8 8 7
5 5 0	0.9 1 2		

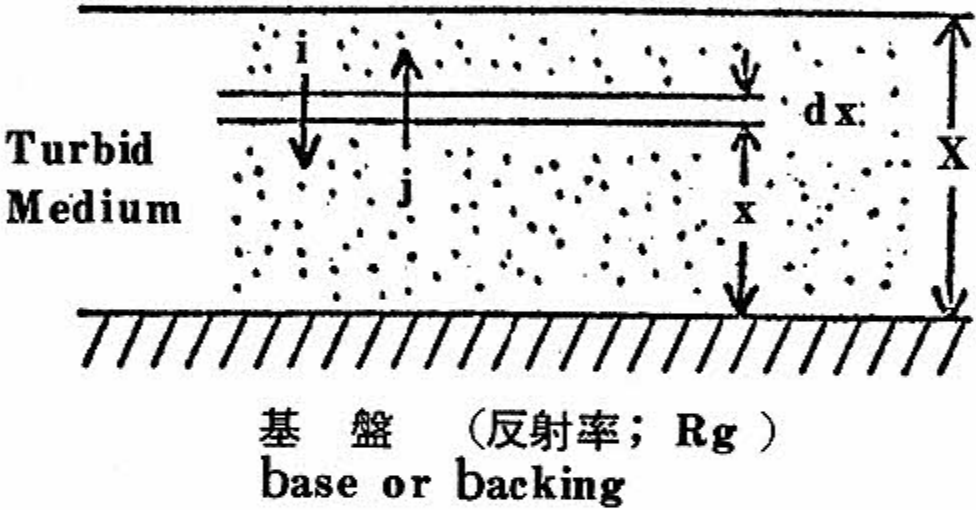


図1 Kubelka-Munk の二流モデル
Kubelka-Munk's two flows' model

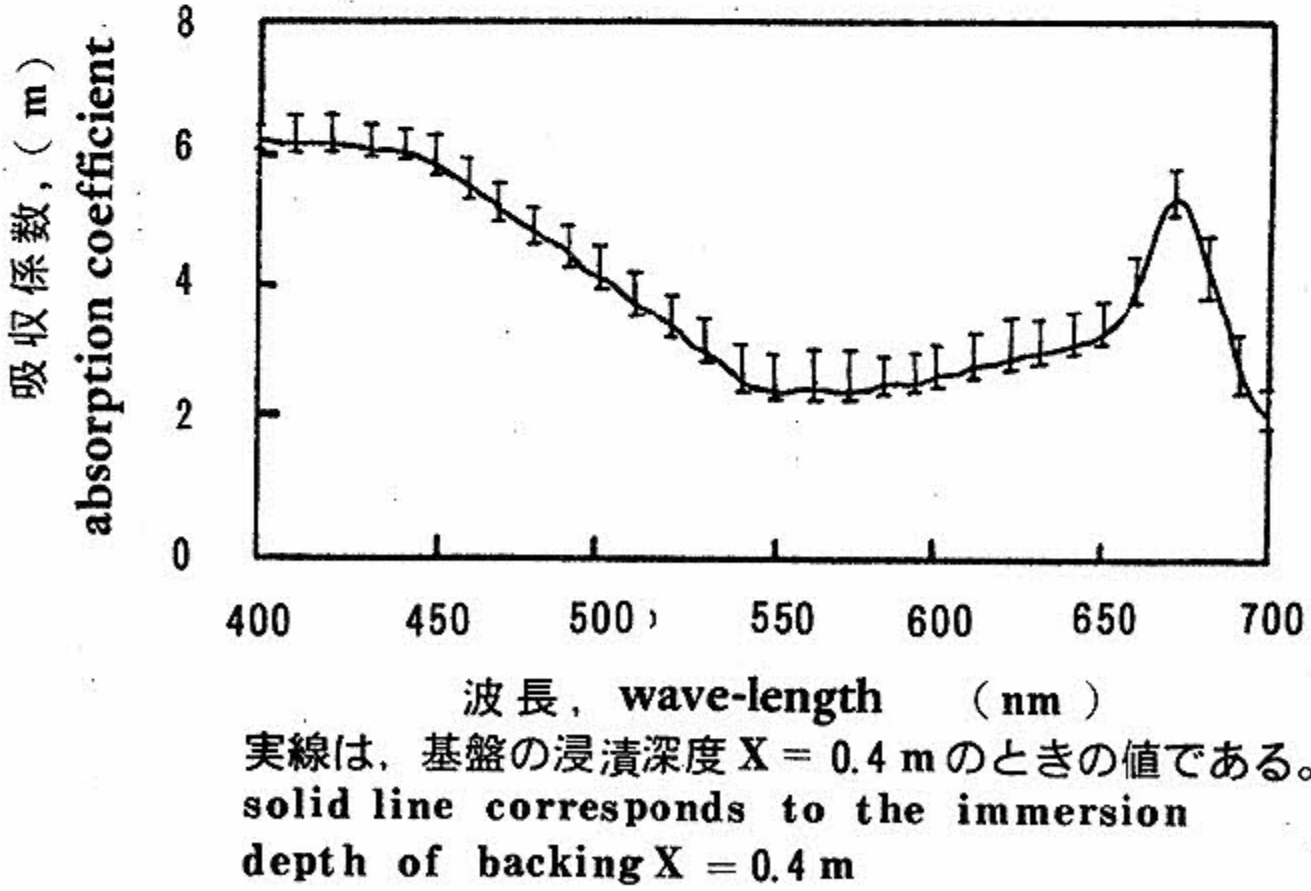
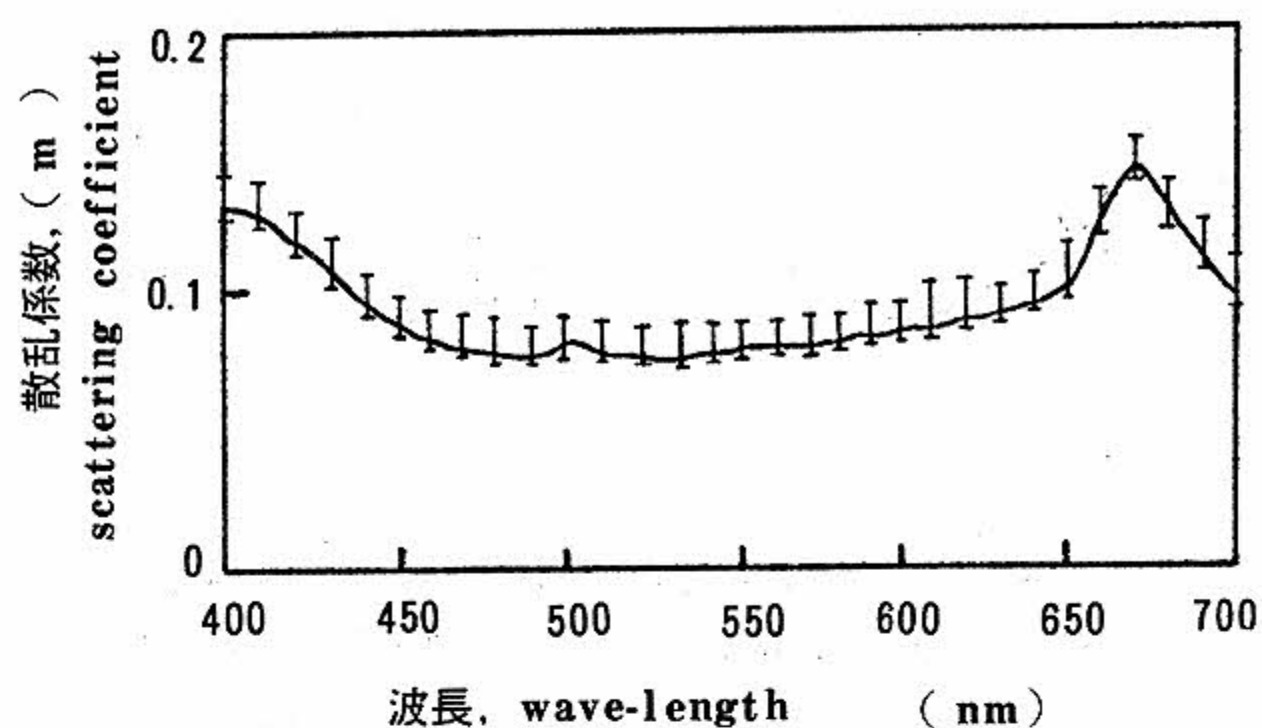


図2 赤潮海水における波長と吸収係数の関係
Relation between wave-length and absorption coefficient



実線は、基盤の浸漬深度 $X = 0.4$ m のときの値である。
solid line corresponds to the immersion depth of backings $X = 0.4$ m.

図3 赤潮海水における波長と散乱係数の関係
Wave-length dependency of scattering coefficient

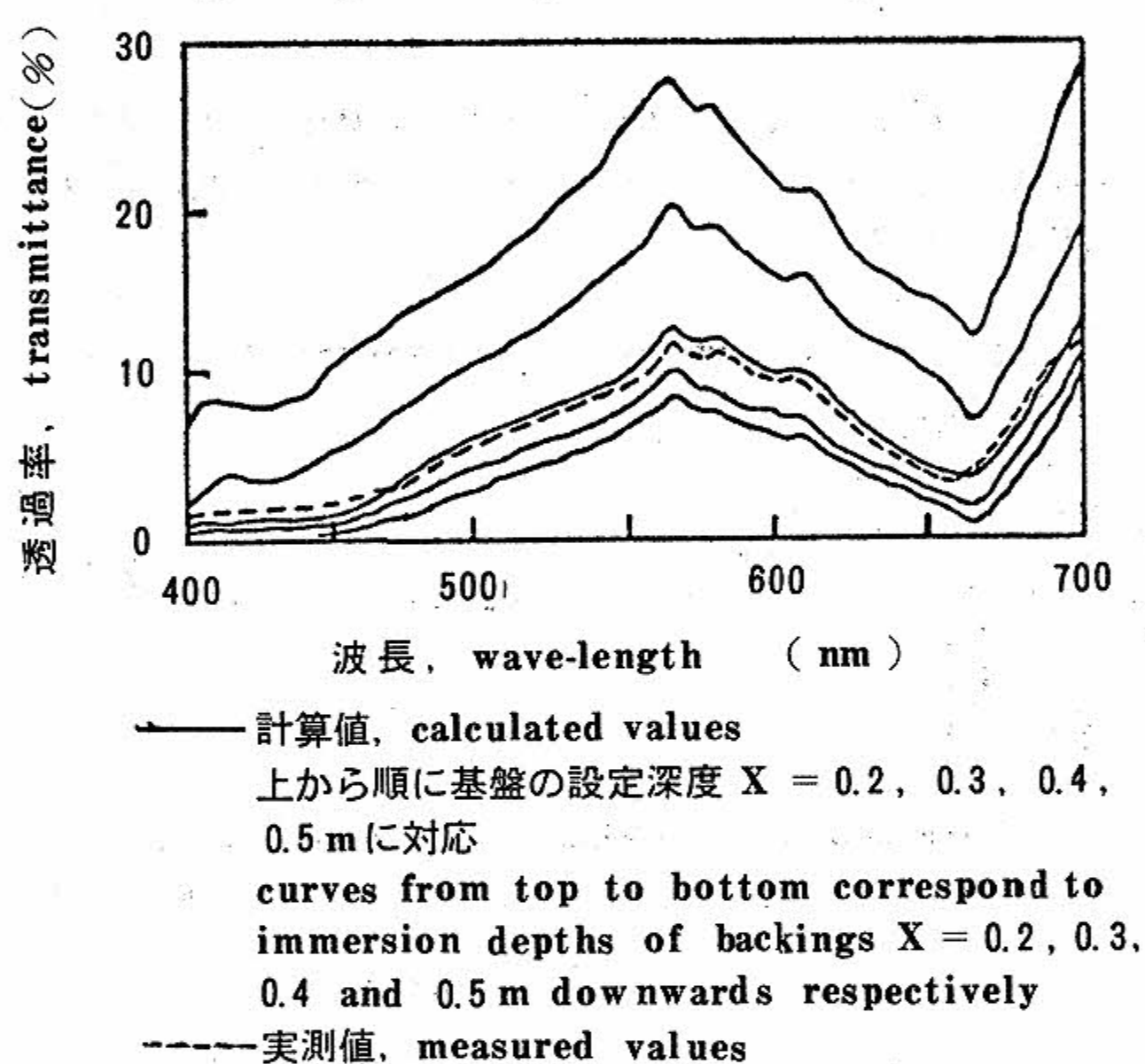


図4 透過率の計算値と実測値の比較
Comparison of calculated values and measured values of transmittance

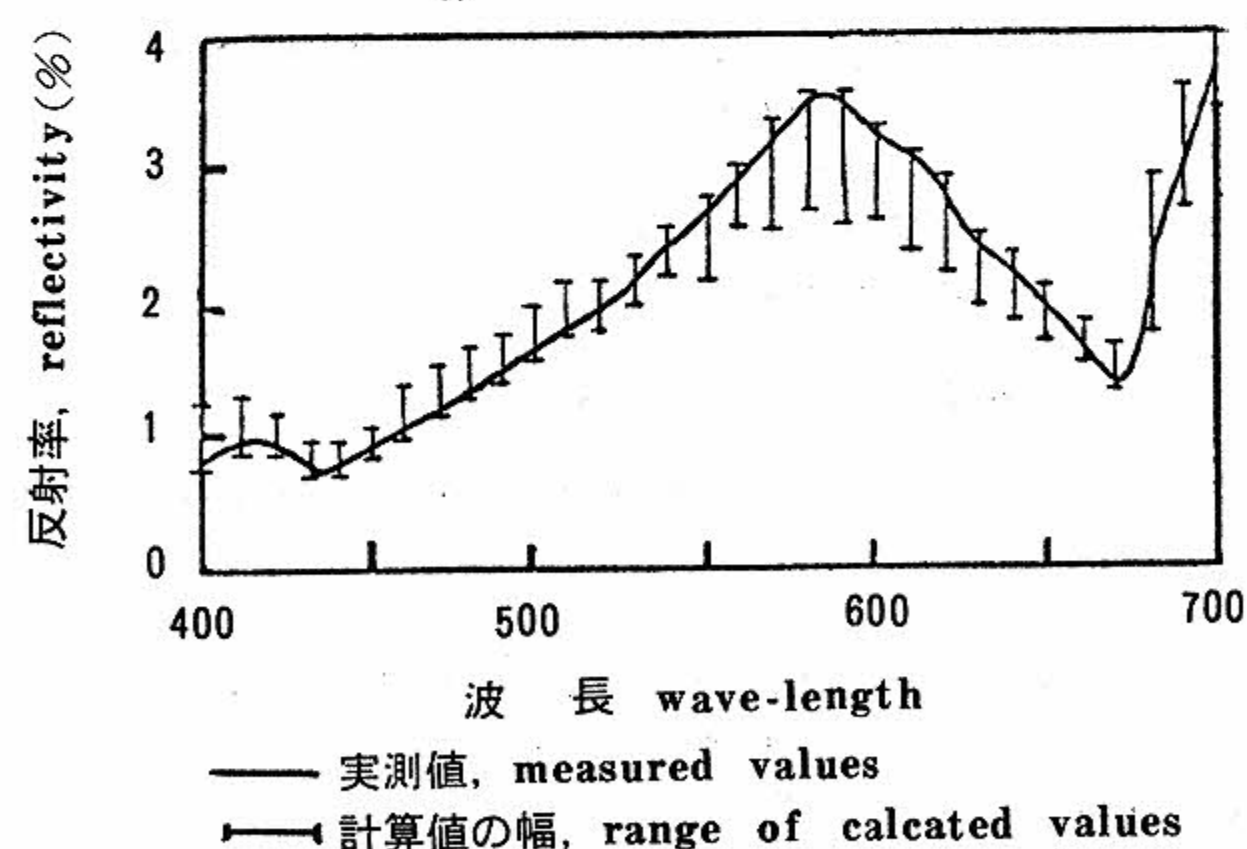


図5 反射率 R_{∞} の計算値と
Comparison of calculated values and measured values of Reflectivity R_{∞}

吸収係数のピークと波長が一致する。670 nm における散乱の原因は不明であるが、赤潮の呈色はある程度裏付けるものと考えられる。ただし、一般に強い吸収特性をもつ物質の色は、吸収される色の余色とされており、吸収性と散乱の両面から考えなければならない。

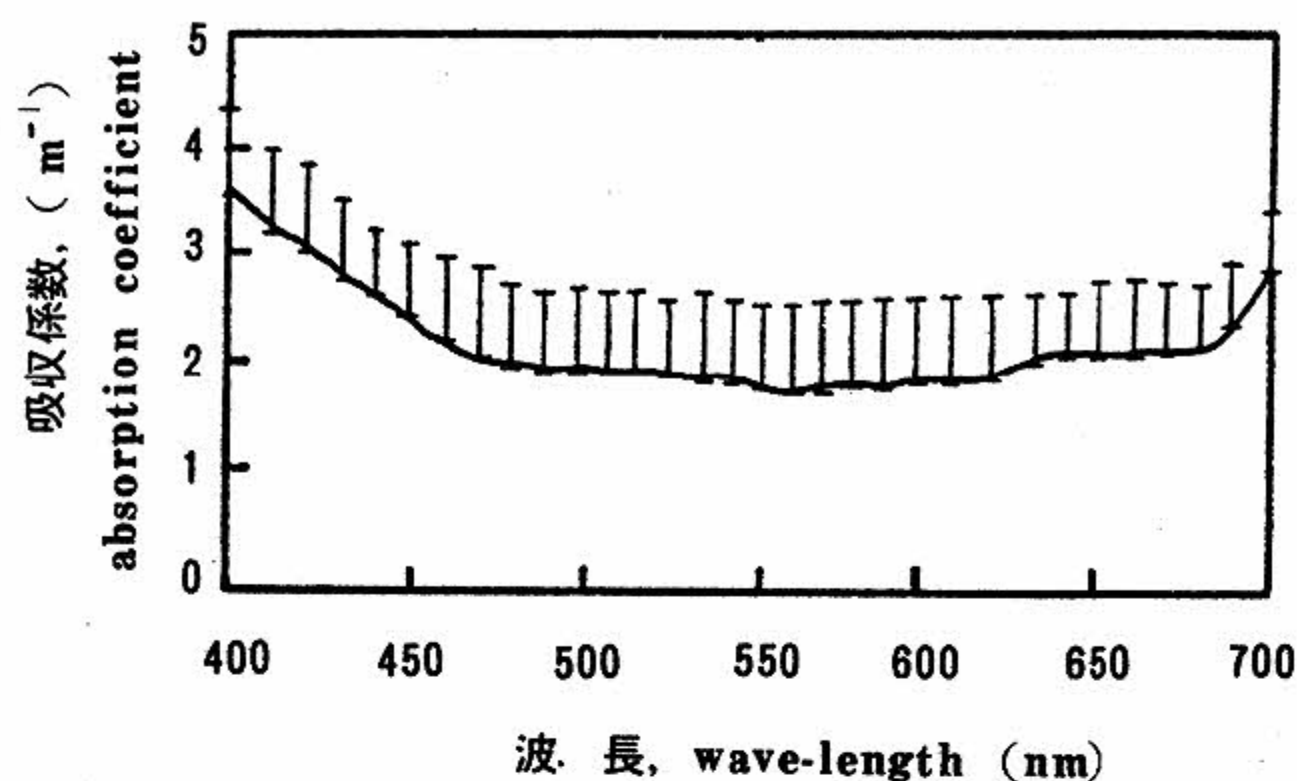
図4は、両係数と Kubelka - Munk パラメーターから計算で求めた植物プランクトンに富む海水の透過率を示す。曲線はすべて、400~500 nm において低い透過率を示し、さらに 670 nm においてクロロフィルの吸収に伴う低い透過率を示している。

一方、図5は、両係数から計算で求めた反射率 R_{∞} と、実測で求めた反射率 R_{∞} を比較したものである。ただし、計算で求めた反射率は、最大値と最小値の間の幅で示してある。図4と図5の比較から、反射率の幅よりも透過率の幅が大きく、計算値においては、反射率よりも透過率の方が、両係数の変動をより大きく反映していると言える。このことから、両係数の妥当性をチェックする場合、透過率における実測値と計算値を比較することも、一つの有効な手段となろう。

また、非生物性懸濁物に富む海水について、測定で求めた波長と吸収係数の関係を図6、波長と散乱係数の関係を図7図に示す。これらの図において両係数とも、400 nm 付近および 700 nm 付近において、わずかに大きい値を示しているが、ほぼ全波長域に亘って、著しい波長特性は示さない。この点が生物性懸濁物と非生物性懸濁物の光学的性質における最も大きな相違点である。

吸収係数、散乱係数、Kubelka - Munk パラメーターから計算で求めた透過率と、実測で求めた透過率の比較を第8図に示す。生物性懸濁物に富む海水の場合と同様に、透過率の曲線は計算値と実測値で酷似した形状をしているが計算値には幅がある。

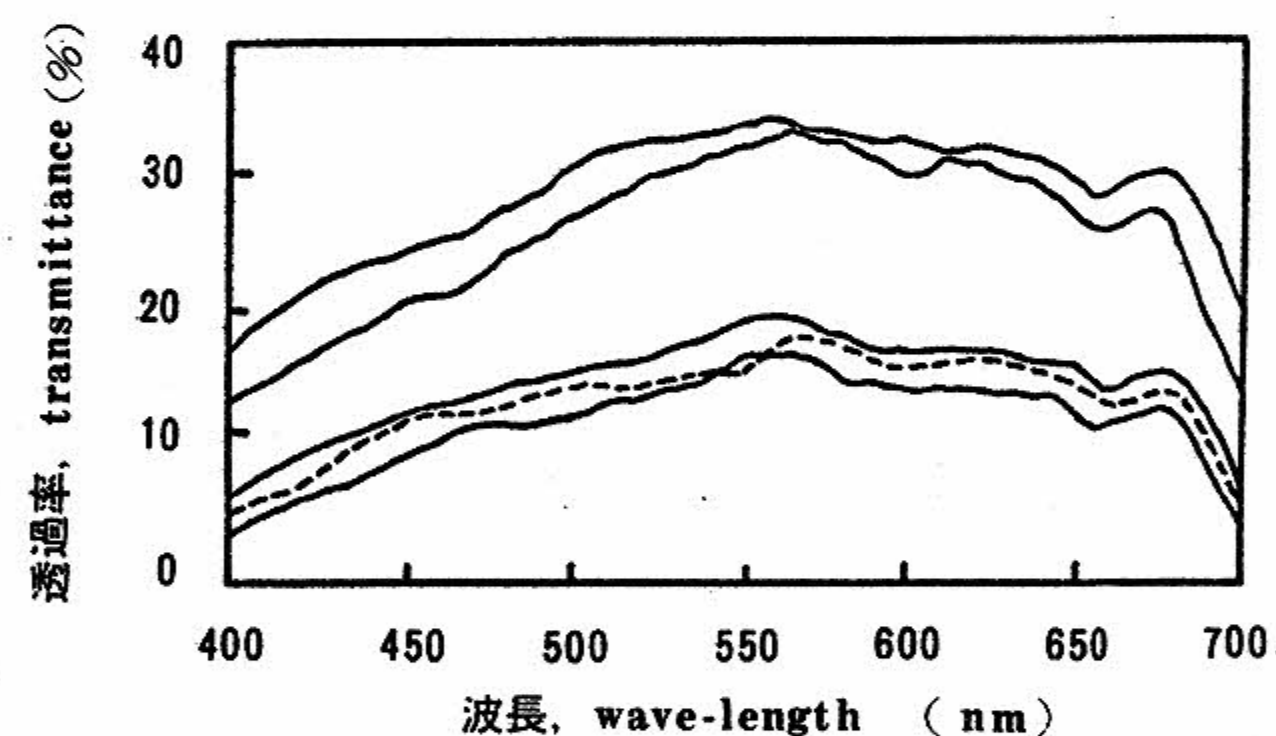
そこで、実測した透過率からランベルトベール (Lambert - Beer) の法測によって求めた全消散係数と、実測した透過率に最も近い計算値を与える $X = 0.4$ のときの Kubelka - Munk モデルによる吸収係数と散乱係数の和を全消散係数として、比較したものを図9に示す。これから、両消散係数は、ほぼ近い値を示すことがわかる。ただし、Kubelka - Munk の二流モデルによる散乱係数は、



実線は、基盤の浸漬深度 $X = 0.4$ m のときの値である。
solid line corresponds to the immersion depth of backing $X = 0.4$ m.

図 6 非生物性懸濁物海水における波長と吸収係数の関係

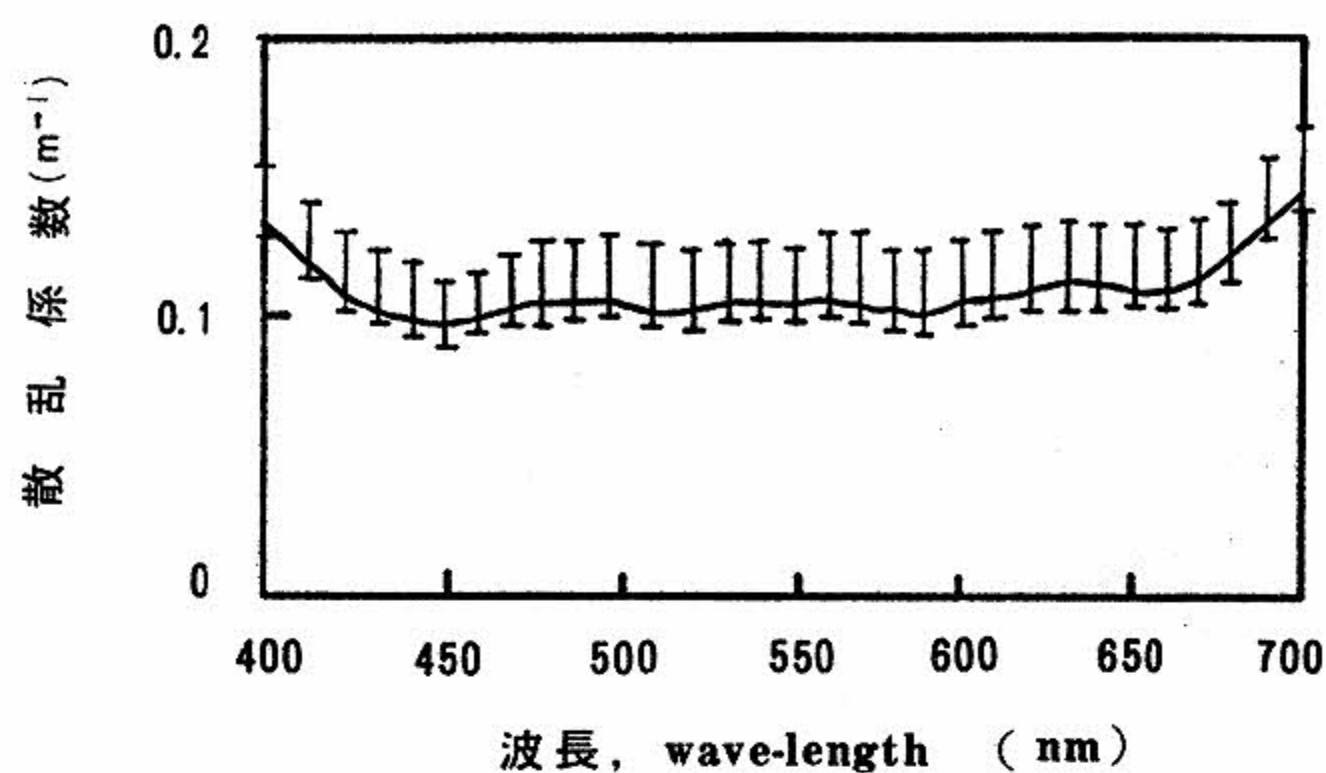
Relation between wave-length and scattering coefficient of seawater of non-biological suspended solid



—— 計算値, calculated values
上から基盤の浸漬深度 $X = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ m に対応する。
curves from top to bottom corresponds to the immersion depths of backings $X = 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5 m respectively
..... 実測値, measured values

図 8 非生物性懸濁物海水の透過率の計算値と実測値の比較

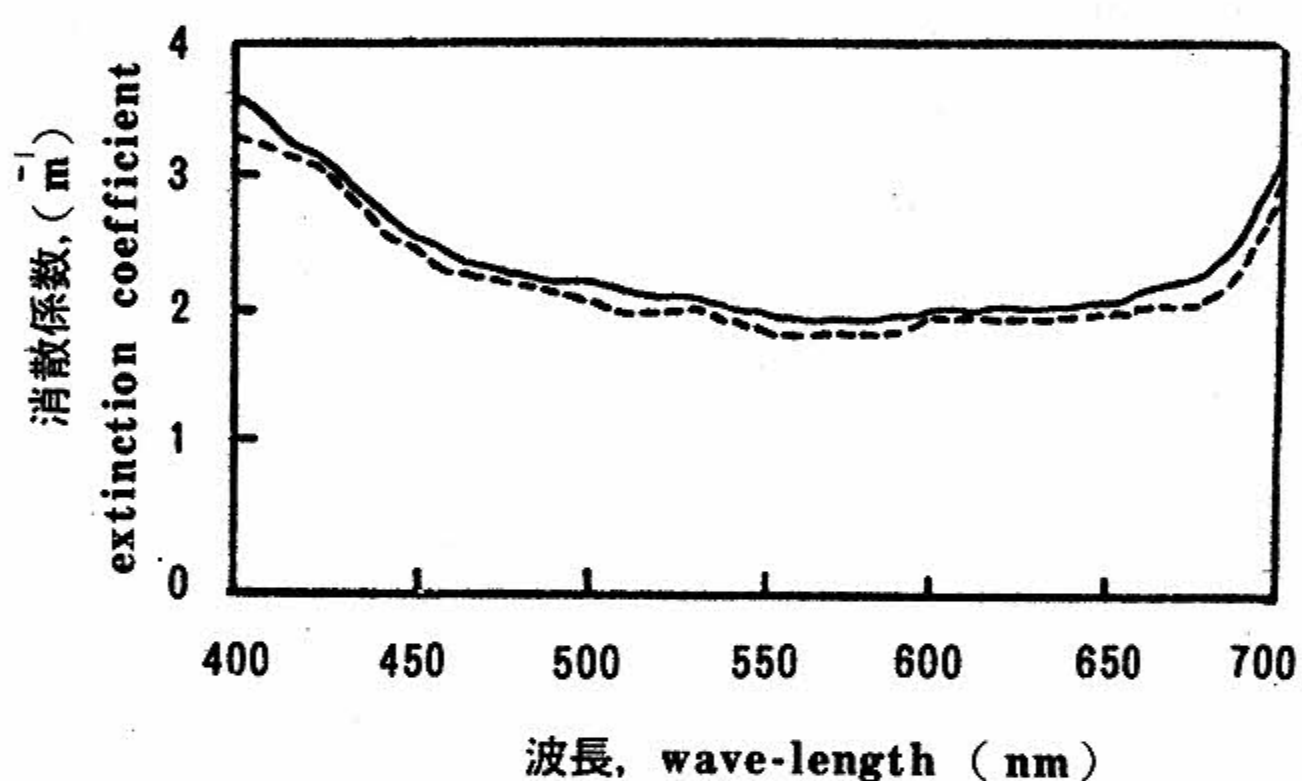
Comparison of calculated values and measured values of transmittance of seawater rich in non-biological suspended solid



実線は、基盤浸漬深度 $X = 0.4$ m のときの値である。
solid line corresponds to the immersion depth of backings $X = 0.4$ m.

図 7 非生物性懸濁物海水における波長と散乱係数の関係

Relation between wave-length and absorption coefficient of seawater of non-biological suspended solid



—— Kubelka-Munk モデルから求めた消散係数, すなわち, Kubelka-Munk の吸収係数と散乱係数の和
extinction coefficient obtained by Kubelka-Munk's model, i.e. the summation of Kubelka-Munk's absorption coefficient and scattering coefficient
..... 透過率の実測値から求めた Lambert-Beer 則における消散係数
extinction coefficient in Lambert-Beer's law calculated from the measured transmittance

図 9 非生物性懸濁物海水における Kubelka-Munk の消散係数と Lambert-Beer の消散係数の比較

Comparison of extinction coefficient in Kubelka-Munk's theory and that in Lambert-Beer's law concerning seawater abundant in non-biological suspended solid

後方散乱係数であることに注意しなければならない。

5. あとがき

従来、懸濁系の吸収係数、および散乱係数を求めることは、きわめて難しい問題であった。

透過率、その他の測定から全消散係数は求められるが、両係数に分離することが困難であった。特に海水における散乱係数は、採水後、室内において散乱計で、平行光に対する体積散乱を測定して体積散乱関数を求め、これを積分して求める方法が代表的であった。また、実海水中の上向照度と下向照度、その他を測定し、計算によって両係数を求める方法の提案もされている。さらに吸収係数等では、拡散光に対する値を平行光に対する値から算出することも行なわれてきた。しかし、一般に懸濁物濃度の低い海水に対する取扱いがほとんどであり、懸濁物濃度の高い海水の光学定数の波長特性については明確な見解はない。特に外洋性の水のように懸濁物濃度の低い海水では、波長依存性はほとんど認められていない。

本研究では生物性懸濁物に富む海水、非生物性懸濁物に富む海水に対してKubelka — Munk のモデルを応用し、両海水の吸収係数、散乱係数を求め、さらに両係数から透過率の計算値を求め、実測値との比較をすることによって光の透過に及ぼす懸濁物の種類の影響と、両係数の妥当性チェックのための尺度として透過率を用いることの2面からアプローチし、一応の成功をみた。

しかしKubelka — Munk のオリジナルモデルは、元来、ある程度散乱の強い系に対してよくあてはまるモデルであり、その点から見れば、本研究に用いた海水は、比較的懸濁物が多く、Kubelka — Munk のモデルにより、光学的特徴をとらえるには都合の良い試水であったと言えよう。ただ、今回は、懸濁物濃度一定の条件下で測定を行ったので、もっと希薄な系については何もわからない。

他の多くのモデルがそうであるように、系内に入射する光が平行光のみ、あるいは平行光と拡散光（例えば海洋を考えればよい）よりなる場合、懸濁物濃度：希薄であれば、系内の光を平行光と

拡散光に分離して考えなければならない。特に懸濁物濃度の低い場合の海洋がこれにあたる。今後はKubelka — Munk の4流モデルを用いて、実海域にアプローチしたい。

文 献

- (1) 海洋科学技術センター、昭和52年度受託研究 海洋遠隔探査技術の開発研究成果報告書 JAMSTECTR 2, 166 (1978)
- (2) Atkins, J.T., 1965, "The Absorption and Scattering of Light in Turbid Media", University of Delaware, Ph. D., 1965 Chemistry Physical, University Microfilms Inc., Ann Arbor, Michigan
- (3) Billmeyer, F.W. Jr., Abrams, R.L., 1973, "Predicting Reflectance and Color of Paint Films by Kubelka-Munk Analysis, I. Turbid Medium Theory", J. Paint Tech. 45 (579) 23
- (4) Billmeyer, F.W. Jr., Phillips, D.G., 1976, "Predicting Reflectance and Color of Paint Films by Kubelka-Munk Analysis, IV. Kubelka-Munk Scattering Coefficient", J. Paint Tech. 48 (616) 30
- (5) Butler, W.L., 1962, "Absorption of Light by Turbid Materials", J.O.S.A. 52 (3) 292
- (6) Caldwell, B.P., 1968, "Kubelka-Munk Coefficients from Transmittance", J.O.S.A. 58 (6) 755
- (7) Kubelka, P., Munk, F., 1931, "Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche", Zeitschr. f. Tech. Physik 12, 593
- (8) Kubelka, P., 1948, "New Contributions to the Optics of Intensely Light-scattering Materials, Part I", J.O.S.A. 38 (5) 448
- (9) 佐々木保徳, 宗山敬, 江村富男, 1979, "反射率測定による海水, 海底の光学定数測定 第2報" JAMSTECTR (3), 110
- (10) Tyler, J.E., 1972, "Predicted Optical Properties for Clear Natural Water", J.O.S.A. 62 (1) 83
- (11) Wells, W.H., 1977, "Diffusion of Light in the Sea", Opt. Eng. 16 (2), 112