

9. 衛星リモートセンシングによる 沿岸海域汚濁解析のための放射伝達モデルの開発

Radiative transfer model for satellite remote sensing of ocean color in coastal zone

小林 拓*・太田幸雄**・村尾直人**・橘 治国**

Hiroshi KOBAYASHI, Sachio OHTA, Naoto MURAO, Harukuni TACHIBANA

Abstract ; For satellite remote sensing of coastal pollution, a radiative transfer model for a coupled atmosphere-ocean system was developed to estimate upward radiance from polluted sea surface. Optical properties of suspended materials in ocean such as phytoplankton (*Skeletonema costatum* and *Heterosigma akashiwo*), detritus, submicron particles and inorganic particles were measured or estimated. The equation of radiative transfer in the coupled atmosphere-ocean system was solved by using Invariance imbedding method. Upward radiance from sea surface in case II water, flowage of soil particles and red tide were calculated. It is, then, possible to estimate the soil particle and the red tide phytoplankton concentration by using the ratio of upward radiance in different wavelengths in satellite remote sensing.

Keywords ; equation of radiative transfer, coastal pollution, flowage of soil particle, red tide

1. はじめに

赤潮や青潮，赤土流出問題¹⁾などの沿岸海域の汚濁対策を行うためには，汚濁状況を定量的に評価することが必要である．この際，広範囲にわたる観測が可能な人工衛星によるリモートセンシングが期待されている．海中に入射した太陽放射は，海中で水分子による Rayleigh 散乱，及び汚濁物質による Mie 散乱，吸収を受け，再び海表面から上空へ放射される．この上向き放射は，汚濁物質の濃度変化により，例えば清浄海域は濃青色，沿岸海域は緑色，赤潮は赤褐色，黄褐色と変化するため，この海色の変化（上向き放射スペクトルの変化）を測定することにより，海域の汚濁状況を把握することが出来る．

そこで本研究では，上向き放射スペクトルと汚濁物質濃度との関係を求めるために，海水中の溶存物質や懸濁物質，海水分子の吸収係数や散乱係数などの光学的特性を与えて，大気・海洋系の光の伝播に関する放射伝達方程式の解法を開発した．そして沿岸海域の汚濁の一例として土砂流出と赤潮を取り上げ，リモートセンシングにより汚濁物質の濃度を推定する手法について基礎的検討を行った．

2. 大気・海洋結合系における放射伝達計算モデル

Fig. 1 に示すように，水平方向に一様な大気及び海洋を考える．ここで τ は光学的厚さといい，大気上端からある高度または水深まで，大気エアロゾルやプランクトンなどの散乱体により散乱吸収を受けて，太陽放射の直達光が減衰するときの減衰係数のことである．太陽放射フラックスは，大きさ πF で，天頂からの角度 θ_0 および方位角 ϕ_0 で入射するものとした．天頂角を θ としたとき $\mu = \cos \theta$ とおき，光学的厚さ τ における (μ, ϕ) 方向の放射の強さを $I(\tau; \mu, \phi)$ とすると，太陽放射の伝達方程式は，次式のように与えられる．

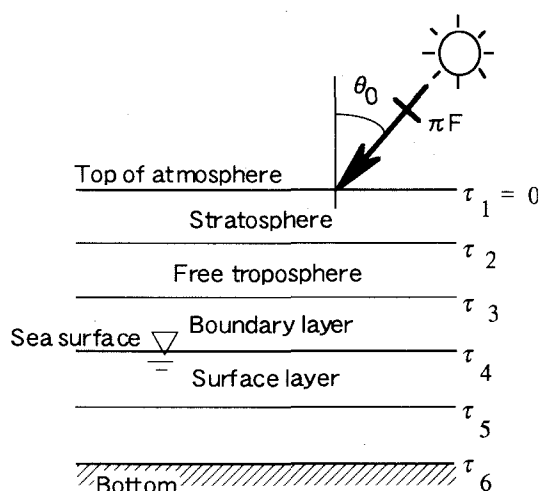


Fig.1 Radiative transfer model for a coupled atmosphere-ocean system.

* 山梨大学 Yamanashi University, ** 北海道大学 Hokkaido University

$$\mu \frac{dI(\tau; \mu, \varphi)}{d\tau} = I(\tau; \mu, \varphi) - \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\tau; \mu, \varphi; \mu', \varphi') I(\tau; \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' - \frac{1}{4} F e^{-\tau/\mu_0} P(\tau; \mu, \varphi; \mu_0, \varphi_0) \quad (1)$$

ここで $P(\tau; \mu, \varphi; \mu', \varphi')$ は、散乱光の角度分布関数で、 (μ', φ') 方向からの放射が (μ, φ) 方向へ散乱されたときの微分断面積を表すものである。

この太陽放射の伝達方程式の解法として、Invariance Imbedding method を用い、大気・海洋結合系における放射伝達計算モデルを開発した。大気は、大気境界層（海面～2km）、自由対流圏（2～11km）、成層圏（11km～40km）の3層に分けた。一方海洋は、表層（海面～5m）及びそれ以下の層（5m以深）の2層とした。各層内においては、エアロゾル及び懸濁粒子の散乱性の強さを表す単一散乱アルベドや、散乱光の角度分布関数などの光学的特性は一樣であるとした。海底面での反射率（アルベド）を考慮し、海面は波がなく平面であると仮定した。波長は380nm～780nm間の波長域について10nm毎に放射伝達計算を行った。

本研究では、可視域におけるリモートセンシングを想定し、大気中の放射伝達過程としては、空気分子によるRayleigh散乱と大気エアロゾルによるMie散乱を考慮した。成層圏エアロゾルはほぼ硫酸粒子であるので、複素屈折率は硫酸の値（ $m = 1.45 - 10^{-4}i$ ）を与えた²⁾。自由対流圏エアロゾルは、飛行機を用いた太陽放射フラックス観測と地上での太陽放射の観測結果から推定された複素屈折率（ $m = 1.55 - 0.01i$ ）を与えた³⁾。大気境界層のエアロゾルは、黒色純炭素、有機物、硫酸アンモニウム、硝酸アンモニウム、海塩粒子、土壌粒子の6成分からなるものとし⁴⁾、Mieの散乱理論を用いて、単一散乱アルベドと散乱光角度分布関数を計算した⁵⁾。

3. 海洋中の懸濁物質の光学的特性

海洋中の懸濁物質として植物プランクトンやその遺骸であるデトリタス、サブミクロン粒子（有機物からなる粒径 $1 \mu m$ 以下の粒子群）および微砂や粘土からなる無機粒子を考慮した。本研究で用いた放射伝達計算においては、単一散乱アルベド、散乱光の角度分布関数、そして消散係数が必要である。これらの光学的パラメータは、各粒子の複素屈折率と粒径分布からMieの散乱理論より算出した。この際、植物プランクトンとその遺骸であるデトリタスに関しては、実際に植物プランクトン（*Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*）の菌株を、国立環境研究所から入手し培養し、複素屈折率の実数部は浸液法によって、虚数部はヘッドオンフォトマルチプライアーを取り付けたダブルビーム分光光度計を用いて測定し、粒径分布は顕微鏡観察により測定した。サブミクロン粒子は、バクテリアや生物起源の有機物からなるものとし、その光学的特性は、文献値^{6) 7) 8)}から推定した。無機粒子の光学的特性は、火山灰土壌の測定値⁹⁾から推定した。*Heterosigma*とその遺骸であるデトリタスの散乱光の角度分布関数をFig.2に、サブミクロン粒子と無機粒子の散乱光の角度分布関数をFig.3に示す。*Heterosigma*やデトリタスは非常に前方散乱が卓越し、一方、サブミクロン粒子や無機粒子の後方散乱は、*Heterosigma*と比べると大きいことがわかった。

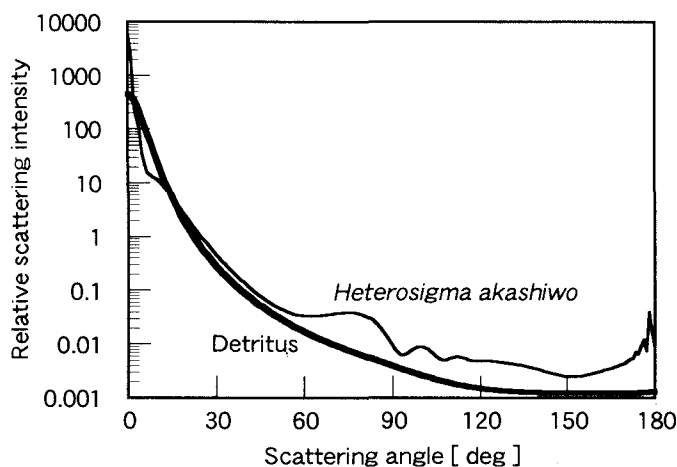


Fig.2 Phase function of *Heterosigma akashiwo* and detritus.

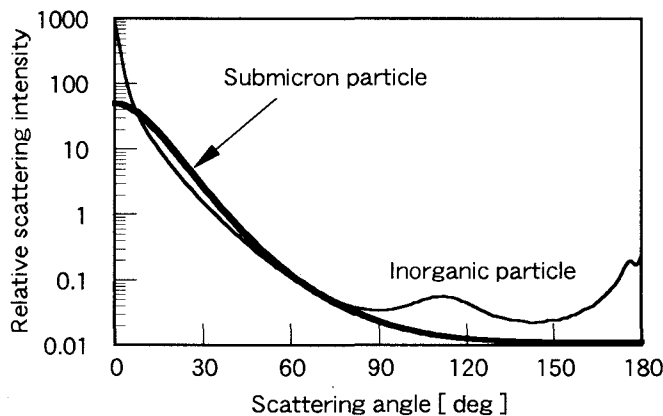


Fig.3 Phase function of inorganic particle and submicron particle.

4. 沿岸海域の上向き放射スペクトルの計算

様々な沿岸海域を対象とし大気-海洋結合系における放射伝達計算モデルを用いて海域からの上向き放射スペクトルの計算を行った。

4. 1 Case II 海域¹⁰⁾

Case II 海域と呼ばれている、植物プランクトンよりも、無機粒子やサブミクロン粒子などの非生物粒子がより多く存在する沿岸海域を対象とした。海洋には植物プランクトン、その遺骸であるデトリタス、サブミクロン粒子、無機粒子、および黄色物質を存在させた。植物プランクトンは、*Skeletonema costatum*とし、濃度はクロロフィル濃度で1mg/Lに相当する6000個/mLの個数濃度で存在させ、表層は5m、水深は50mとした。これらのパラメータをもとに、海面直上における散乱光の上向き放射輝度を求めた (Fig.4)。この際、比較のために黒潮などの清浄な外洋域の放射輝度の計算結果も同時に示した。その結果、Case II 海域において、480~580nmの波長領域における上向き放射輝度が増加し、明るく緑がかった海色が再現された。

4. 2 土砂流出海域

土砂流出時は、土砂粒子の散乱量が他の粒子のものに比べて卓越すると考えられるので、懸濁物質として土砂粒子のみを海中に存在させた。この土砂粒子の光学的特性は、無機粒子の値を用いた。また河川から海域に流れ出る黄色物質も存在させ、その濃度は2mg/Lとした。土砂粒子の重量濃度は、10mg/Lから10000mg/Lまで増加させた。各重量濃度時の海面直上における散乱光の上向き放射輝度を求めた結果をFig.5に示す。土砂粒子の濃度の増加に伴い、550nmより長波長領域で上向き放射輝度が増加し、海

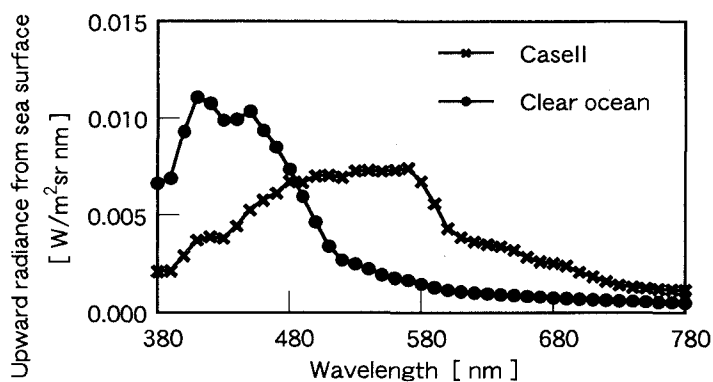


Fig.4 Upward radiance from sea surface in Case II water and clear ocean.

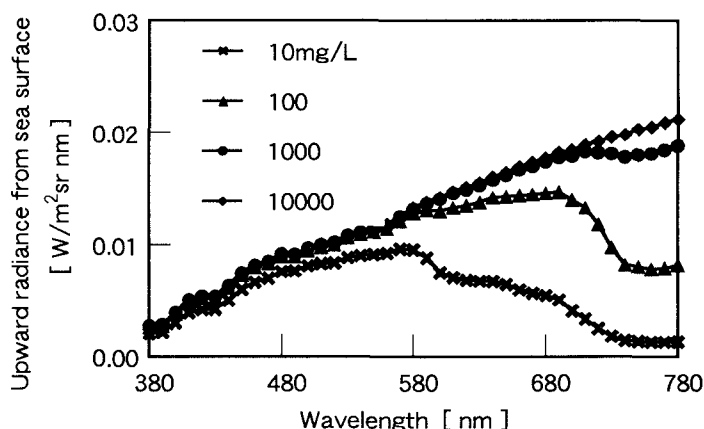


Fig.5 Upward radiance from sea surface in coastal zone flowed soil particles for four different mass concentrations of soil particle.

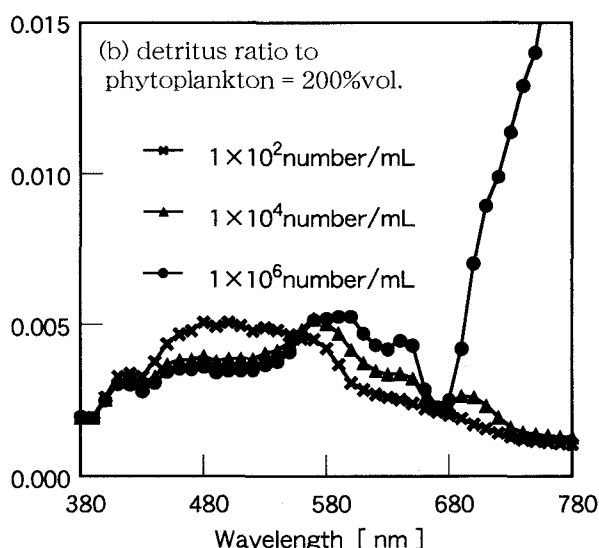
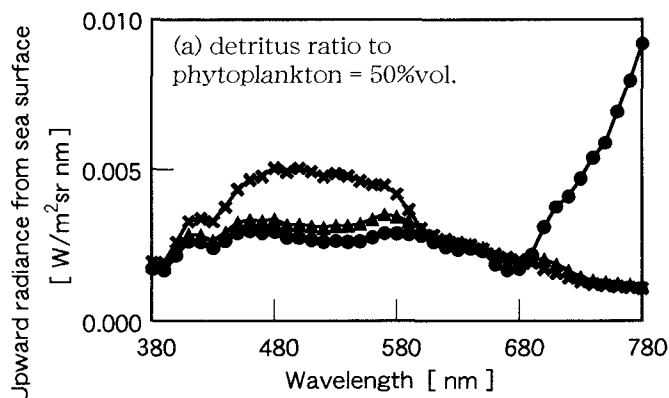


Fig.6 Upward radiance from sea surface in coastal zone occurred red tide for three different concentrations of phytoplankton and two different detritus existence ratio.

色が茶色に変化する様子が再現された。

4. 3 赤潮発生海域

赤潮プランクトンは、*Heterosigma akashiwo*とした。そして赤潮プランクトンとともに海洋中にプランクトンの遺骸であるデトリタス、サブミクロン粒子、そして無機粒子を存在させた。しかしデトリタスは、その赤潮プランクトン集団の生長段階によってその存在量が大きく変化することが予想される。そこでデトリタスと赤潮プランクトンとの存在割合を幾通りか用意した。

赤潮プランクトン以外の植物プランクトン濃度は、平常時の1個/mLから、赤潮発生時の 10^6 個/mLまで増加させた。そのとき付随して発生すると考えられるデトリタスをプランクトンとの体積割合比で、植物プランクトンの50%、200%とした。

海面直上における散乱光の上向き放射輝度を求めた結果を、Fig.6に示す。赤潮といわれる濃度である 5×10^3 個/mLを越えるあたりからスペクトルが変化していることがわかった。またデトリタスの存在量により、赤潮発生海域の上向き放射輝度が大きく変化することがわかった。例えばデトリタスの存在割合が赤潮プランクトンに比べ50%の時は、プランクトンの増加に伴い上向き放射輝度が減少した。一方200%の時は、プランクトンの増加に伴い上向き放射輝度が大幅に増加しており対照的な結果となった。また赤潮プランクトンが 1×10^5 個/mLを越えたあたりから700nmより長波長領域で上向き放射輝度が増加した。通常、この波長域は海水分子による吸収が強いので、前述のCase IIの海域においては、海面直上での上向き放射輝度は非常に弱い。しかし赤潮発生時に大幅に増加するのは、赤潮プランクトン自身、およびそれに付随して発生するデトリタスの散乱の効果が、海水分子の吸収の効果より上回ったためと考えられる。これらのことは、この波長域に感度をもつセンサを用いて、この波長域の上向き放射輝度の測定を行うことが可能であるならば、赤潮のリモートセンシングに非常に有効であることを示唆している。

5. リモートセンシングによる

汚濁物質濃度の推定の可能性

5. 1 TM センサを対象とした

土砂粒子の重量濃度推定アルゴリズム

4章で得られた大気上端での上向き放射輝度と土砂粒子濃度との関係をもとにTMのバンド毎の放射輝度を計算した。大気混濁係数 $\beta = 0.15$ としたときのバンド1とバンド3の比を計算した結果をFig.7に示す。重量濃度の変化に伴い大きくバンド間の比が変化した。よってリモートセンシングにより土砂粒子の重量濃度の推定は可能であるといえる。

リモートセンシング技術センターから、1989年9月4日の土砂流出をとらえた画像データ（シーン110-36）を入手した。神戸海洋気象台によると前

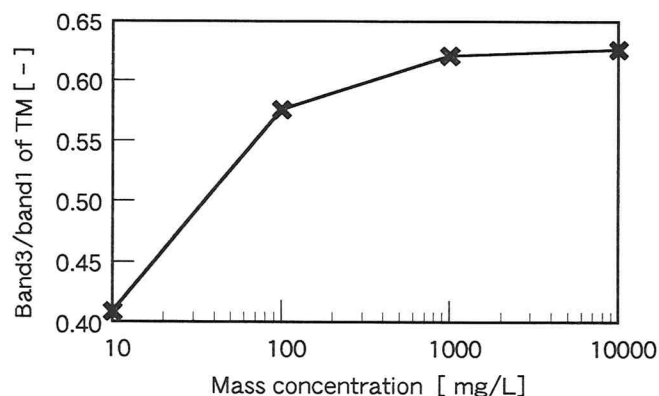


Fig.7 Relation with ratio of upward radiance in two different wavelengths correspond to band1 and band3 of Landsat TM to mass concentration of soil particle.



Fig.8 Contour of soil particle concentration around Osaka bay at 1989.9.4

日の1989年9月3日には1日あたりの総降水量が121.5mmを記録していた。Fig.7の関係を用いて画像データを解析し、土砂粒子の濃度推定を行った結果をFig.8に示す。各河川の河口付近で1000mg/Lを越える土砂粒子が存在することや、潮流による土砂粒子の流出の様子がわかった。

5. 2 赤潮発生海域におけるリモートセンシング

4章で得られた大気上端での上向き放射輝度と赤潮プランクトン濃度との関係をもとに、TMのバンド毎の放射輝度を計算した。大気混濁係数 $\beta = 0.15$ として、可視領域のバンド1とバンド3との比を計算した結果をFig.9に示す。デトリタスの存在割合が高いときは、赤潮プランクトン濃度を推定できることがわかった。しかしデトリタスの存在割合が低い場合、すなわち赤潮の初期段階では、バンド間比の変化が小さく濃度推定は困難であることがわかった。

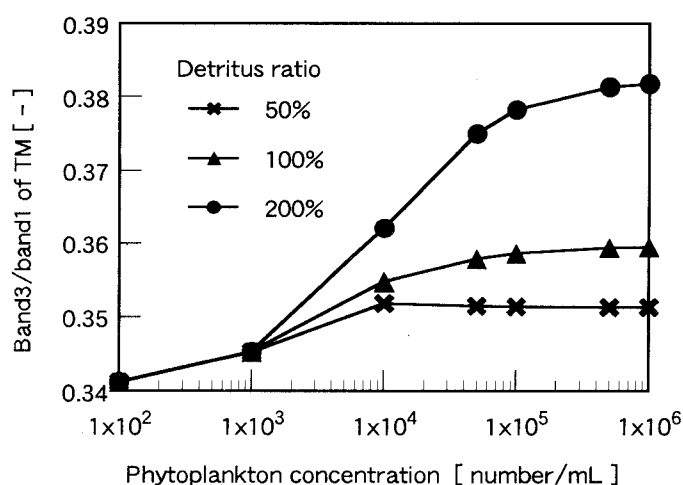


Fig.9 Relation with ratio of upward radiances in two different wavelengths correspond to band1 and band3 of Landsat TM to phytoplankton concentration.

【謝辞】 国立環境研究所の恵良田真由美氏には本研究で用いたプランクトンの培養に関してご指導とご助言を戴いた。赤潮の発生状況に関して、香川県赤潮研究所の吉松定昭氏、ならびに兵庫県水産試験場の堀豊氏にご協力を戴いた。記してここに厚く御礼申し上げます。

なお、LANDSAT 衛星の画像データは米国政府の所有で宇宙開発事業団より提供を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 日本海洋学会編：海洋環境を考える，恒星社厚生閣，1994
- 2) Wang P. H., McCormick M. P., Swisler T. J., Osborn M. T., Fuller W. H. and Yue G. K. : Influence of stratospheric aerosol composition and size distribution from SAGE II satellite measurements, J. Geophys. Res., Vol.94, No.D6, 8435-8446, 1989
- 3) Asano S. : Aircraft measurements of the radiative effect of tropospheric aerosols : II. Estimation of aerosol optical properties, J. Meteor. Soc. Japan, Vol.67, 1023-1034, 1989
- 4) Ohta S. and Okita T. : A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo, Atmospheric Environment, Vol.24A, 815-822, 1990
- 5) Ohta S., Hori M., Murao N., Yamagata S. and Gast K. : Chemical and optical properties of lower tropospheric aerosols measured at Mt. Lemmon in Arizona, J. Global Environment Eng., Vol.2, 67-78, 1996
- 6) 高橋正征・古谷研・石丸隆監訳：動物プランクトン／生物サイクル，東海大学出版会，1996
- 7) Koike, I., S. Hara, K. Terauchi, and K. Kogure. : Role of sub-micrometre particles in the ocean, Nature, Vol.345, 242-244, 1990
- 8) Jonasz, M., G. Fournier, and D. Stramski. : Photometric immersion refractometry : a method for determining the refractive index of marine microbial particles from beam attenuation, Appl. Opt., Vol.36, 4214-4225, 1997
- 9) 目黒享：土壌粒子の可視領域吸収係数の測定，昭和61年度北海道大学工学部衛生工学科卒業論文，1987
- 10) Morel, A., and L. Prieur : Analysis of variations in ocean color, Limnol. Oceanogr., Vol.22, 709-722, 1977