



Title	衛星リモートセンシングのための放射伝達モデルの開発
Author(s)	小林, 拓; 太田, 幸雄; 村尾, 直人 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 地球環境 . 3-3
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 85-90
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7270">https://hdl.handle.net/2115/7270</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-3-3_p85-90.pdf



3-3

衛星リモートセンシングのための放射伝達モデルの開発

小林 拓 (山梨大学), 太田幸雄, 村尾直人, 橘 治国, 山形 定 (北海道大学)

1. はじめに

赤潮や青潮, 赤土流出問題<sup>1)</sup>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.

この汚濁物質濃度と上向き放射スペクトルとの関係を求める方法に統計的手法と光学理論に基づく手法がある. 統計的手法は, 汚濁物質濃度と上向き放射スペクトルを多くの地点で測定して回帰直線を求め, 他の水域や他の日時に用いる方法である. これは, 人工衛星の飛来日に合わせ水域のクロロフィル濃度などの水質項目の観測(衛星同期観測)を行い, 得られた水質項目の測定値と衛星センサの各バンドのカウント値もしくはカウント値の比とを単回帰分析して回帰直線を求める方法である. これまでの沿岸海域を対象としたリモートセンシングにおいて, 多くはこの手法が用いられてきた. しかし,

- ・調査した水域内で, 測定地点間の濃度差がないと分布がある濃度域に集中してしまい, 回帰直線が引けなくなる.
- ・沿岸海域は陸域からの流入の影響を受けやすく, 場所や日時の違いにより解析対象以外の物質の濃度が変化し, 分布がばらつき回帰直線の信頼性が低下してしまう. 例えばA湾の夏の同期観測で求められた関係が, A湾の冬や他のB湾の解析に適用できるか検討しなければならない.
- ・得られた関係が測定された濃度範囲より低い濃度域や例えば赤潮といった高い濃度域まで直線で外挿できるか不明である.

といった点で沿岸海域を対象としたリモートセンシングにおいて, 統計的手法により信頼性や安定性の高い関係が求められた例はない. 一方, 光学理論に基づく手法は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を解き, 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方法である. このため, 様々な物質が存在する海域を対象とし, その存在量を個々に変化させた際の上向き放射スペクトルと汚濁物質濃度との関係を算出することが可能となる. この際, 海洋中の各物質の光学的特性を把握しておけば, 信頼性の高い関係を求めることができる.

そこで本研究では, 沿岸海域を対象としたリモートセンシングのための大気-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, 水平方向に一樣な大気及び海洋を考える. ここで $\tau$ 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 $\pi F$ で, 天頂からの角度 $\theta_0$ および方位角 $\phi_0$ で入

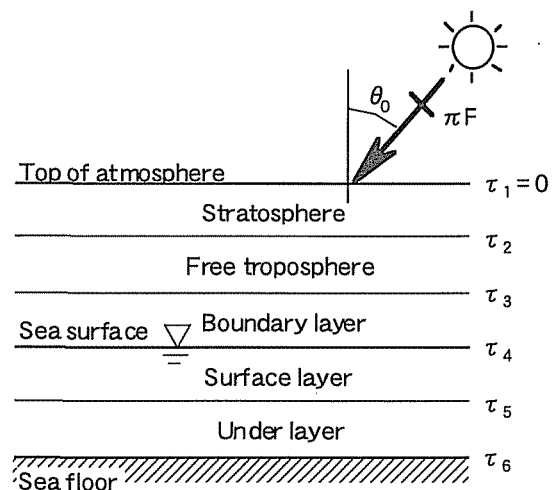


Fig.1 Radiative transfer model for a coupled atmosphere-ocean system.

射するものとした。天頂角を $\theta$ としたとき $\mu = \cos\theta$ とおき、光学的厚さ $\tau$ における $(\mu, \varphi)$ 方向の放射の強さを $I(\tau; \mu, \varphi)$ 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。

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

ここで $P(\tau; \mu, \varphi; \mu', \varphi')$ は、散乱光の角度分布関数で、 $(\mu', \varphi')$ 方向からの放射が $(\mu, \varphi)$ 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<sup>2)</sup>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様であるとした。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( $m = 1.45 - 10^{-8}i$ )を与えた<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。Mieの散乱理論を用いて、各層ごとに単一散乱アルベドと散乱光角度分布関数を計算した<sup>6)</sup>。

### 3. 海洋中の物質の光学的特性

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 $1 \mu\text{m}$ 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*

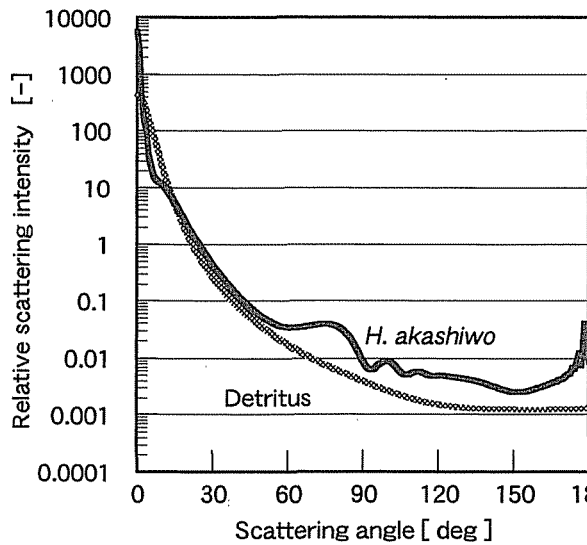


Fig.2 Phase functions of *Heterosigma akashiwo* and its detritus.

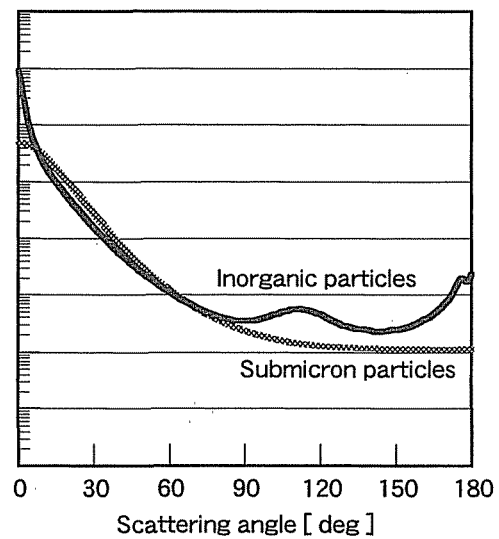


Fig.3 Phase functions of inorganic particles and submicron particles.

*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<sup>7)</sup>によって、虚数部はヘッドオンフォトマルチプライヤ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<sup>8)</sup>、粒径分布は顕微鏡観察により測定した。

サブミクロン粒子の光学的特性は、文献値<sup>7) 9) 10)</sup>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<sup>11)</sup>から推定した。*H. akashiwo*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。*H. akashiwo*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、*H. akashiwo*と比べると大きいことがわかった。

海洋中の溶存物質としては、溶存性有機物 (DOM) であるフミン質などの黄色物質を考慮した<sup>12)</sup>。

#### 4. 様々な海域の上向き放射輝度スペクトルの計算

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輝度スペクトルの計算を行った。

##### 4. 1 清浄な海域および Case II 海域<sup>13)</sup>

清浄な海域とは、植物プランクトンなどの懸濁物質の非常に少ない黒潮といった清浄な外洋域を指している。一方、Case II 海域とは、植物プランクトンだけでなく、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し、これらが海色に大きく影響を与えている沿岸海域のことである。清浄な海域には、*S. costatum*とサブミクロン粒子をそれぞれ0.01個/ml、 $1 \times 10^6$ 個/ml存在させた。Case II 海域には、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、*S. 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、デトリタスは植物プランクトンの体積の10%、サブミクロン粒子は $5 \times 10^7$ 個/ml、無機粒子および黄色物質はそれぞれ $1 \mu\text{g/l}$ 、 $2 \mu\text{g/l}$ 存在させた。海面直上における散乱光の上向き放射輝度の計算結果をFig.4に示す。清浄な海域の上向き放射輝度は、青領域に非常に強いピークを示した。この海域は懸濁物質が少なく海色が海水分子によって支配されているおり、海水分子の青領域における高い散乱性と緑から赤領域にかける強い吸収性のため前述のようなスペクトルとなった。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。この海域においては無機粒子やサブミクロン粒子といった散乱性の高い非生物粒子が多く存在し、全波長域にわたり上向き放射輝度を増加さ

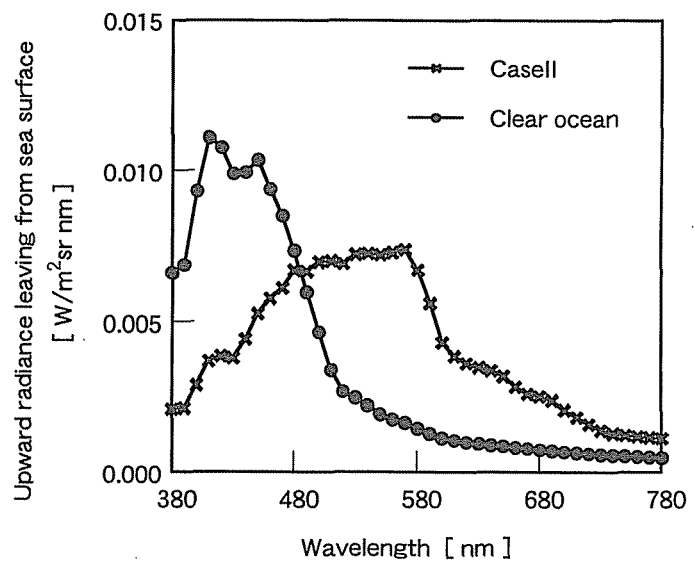


Fig.4 Upward radiances leaving from sea surface in Case II waters and clear ocean.

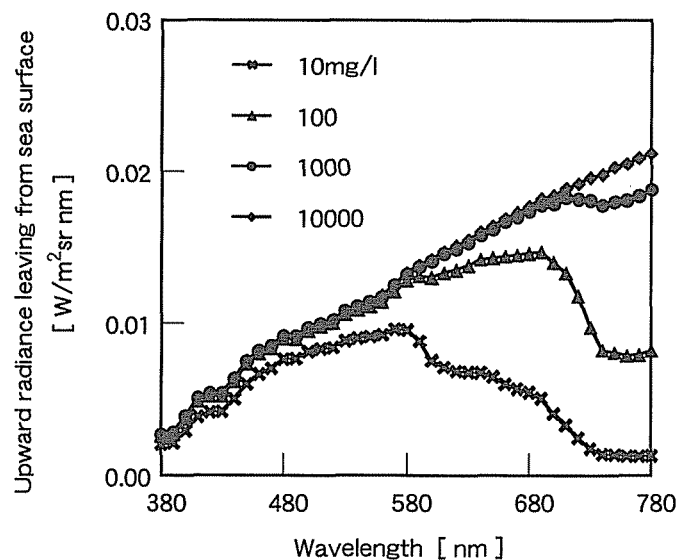


Fig.5 Upward radiances leaving from sea surface in waters flowed soil particles for four different mass concentrations.

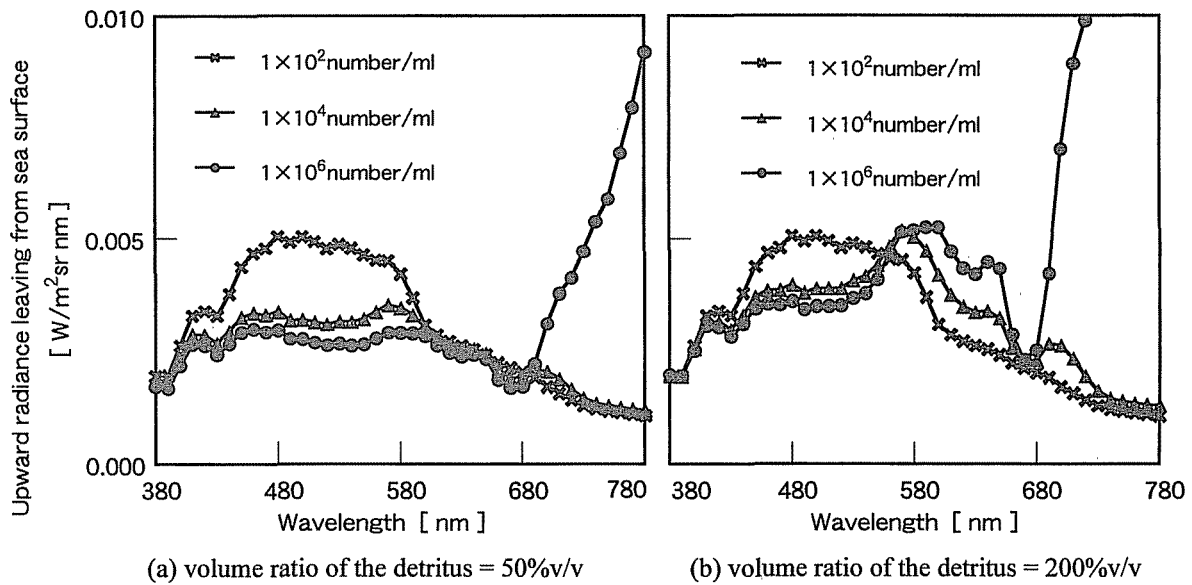


Fig.6 Upward radiances from sea surface in waters occurred red tide for three different phytoplankton concentrations in the case of volume ratio of the detritus = 50 and 200%v/v

せている。また植物プランクトンは、青領域に強い吸収をもつのため、青領域が減少し、これらの結果、緑領域の上向き放射がピークとなって現れている。

#### 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、*H. 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対数増殖期や死滅期といった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。

赤潮プランクトン濃度は、低濃度である1個/mlから、赤潮発生時の $1 \times 10^8$ 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で、植物プランクトンの50%v/v, 200%v/v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。赤潮発生状況に相当する濃度である $1 \times 10^4$ 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対し50%v/v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%v/vの時は、プ

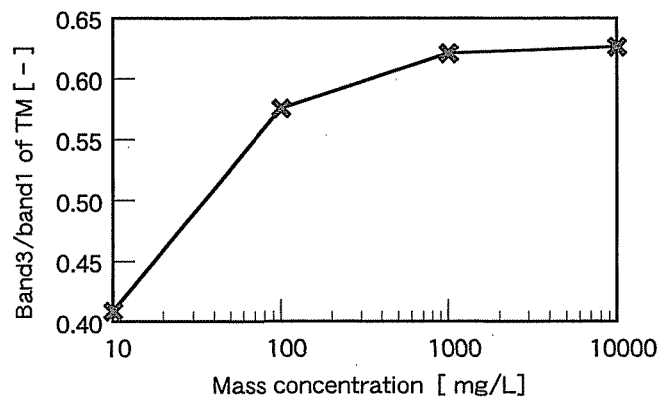


Fig.7 Relationship between ratio of upward radiances leaving from top of the atmosphere at two different wavelengths correspond to band1 and band3 of LANDSAT TM and mass concentration of soil particles.

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。これらの結果は、赤潮発生時の海色に対しデトリタスの存在量が大きく影響を与えていることを示している。また赤潮プランクトン濃度が  $1 \times 10^6$  個/ml の場合、700nm より長波長領域で上向き放射輝度が増加した。通常、この近赤外域は海水分子による吸収が強いため、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、この近赤外領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おいて非常に有効であることを示唆している。

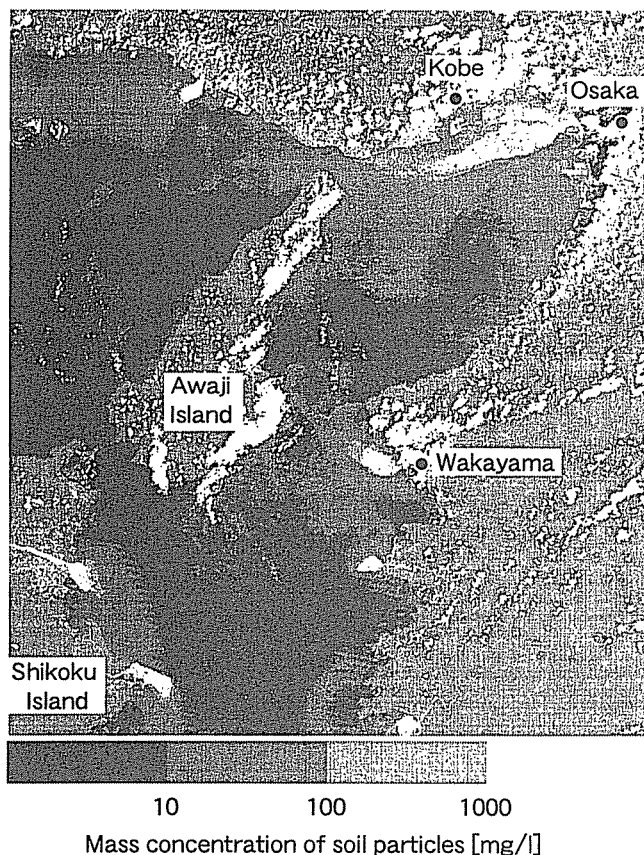


Fig.8 Contour of soil particle concentration around Osaka bay on September 4, 1989.

### 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

地球観測衛星やセンサの中から、高い解像度を有している点、ならびに可視領域の青、緑、赤にバンドを持つ点から LANDSAT TM センサを対象として、アルゴリズムの検討を行った。

人工衛星のセンサが検出するのは大気上端における散乱光の上向き放射輝度である。しかしこの人工衛星のセンサが検出した放射輝度のうち、海洋中の情報を有する海面直上での上向き放射輝度の割合は5~20%以下である。残りの大気からの上向き放射輝度成分は光路輝度と呼ばれており、大気エアロゾル濃度の変化により非常に大きく変動する。すなわち海域を対象としたリモートセンシングの際には、大気上端での上向き放射輝度のうち、光路輝度による成分を取り除く、いわゆる大気補正が必要となる。

いま、リモートセンシングを行おうとする海域の少なくとも1点において、サンフォトメーターなどにより、大気混濁度  $\beta$  を決定し、さらに、エアロゾルの光学的特性が測定されているならば、海面直上での上向き放射輝度と汚濁物質濃度との関係を、大気上端での上向き放射輝度から抽出可能となる。そこで本研究では、大気混濁係数および大気エアロゾルの粒径分布と複素屈折率は既知であるとして、大気上端での上向き放射と海洋中の汚濁物質濃度との関係を考察した。

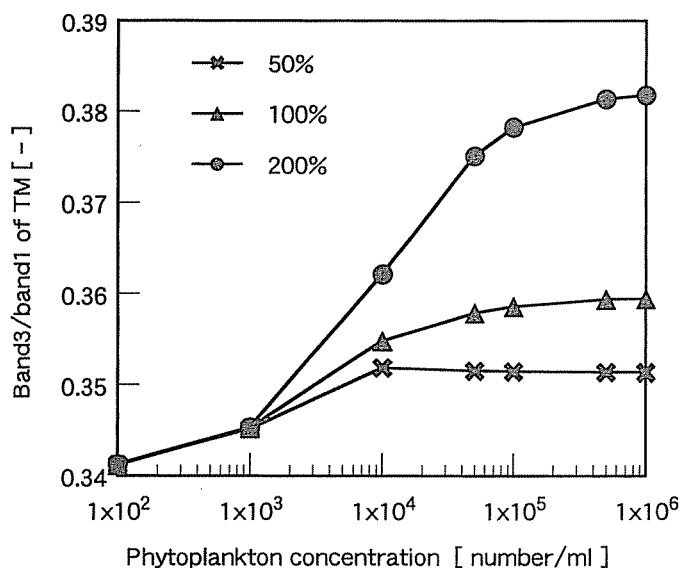


Fig.9 Relation with ratio of upward radiances in two different wavelengths correspond to band1 and band3 of Landsat TM to phytoplankton concentration.

### 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

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

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。この結果からデトリタスの存在割合の違いによりバンド間比の変化が異なるため、この2つのバンドの比のみを用いたアルゴリズムでは濃度推定は不可能である。将来的には、非常に多くのバンドを持つセンサ（Hyperspectral sensor）が開発されつつあり、プランクトン濃度と同時にデトリタスといった他の懸濁物質の濃度を同時に決定するようなアルゴリズムの構築が可能となる（数学的には未知数の数だけバンドがあればよい）。この際、光学理論を用いた手法である本研究は、このアルゴリズムの開発において必要不可欠となる。

[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。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) Chandrasekhar, S.: Radiative Transfer, Dover, 1960
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Ohta S. and Okita T.: A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo, Atmospheric Environment, Vol.24A, 815-822, 1990
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Bricaud, A., and A. Morel.: Light attenuation and scattering by phytoplankton cells: A theoretical modeling, Appl. Opt., Vol.25, 571-580, 1986
- 9) 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
- 10) Koike, I., S. Hara, K. Terauchi, and K. Kogure.: Role of sub-micrometre particles in the ocean, Nature, Vol.345, 242-244, 1990
- 11) 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
- 12) Nelson J. R. and S. Guarda.: Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States, J. Geophys. Res., Vol.100, 8715-8732, 1995
- 13) Morel, A., and L. Priour: Analysis of variations in ocean color, Limnol. Oceanogr., Vol.22, 709-722, 1977