

水深・底質リモートセンシングのための 浅水域可視光反射率モデルに関する検証と提案

VALIDATION AND PROPOSAL ON THE REFLECTANCE MODEL FOR
SHALLOW WATER REMOTE SENSING OF DEPTH AND BOTTOM MATERIAL

神野有生¹・鯉渕幸生²・磯部雅彦³

Ariyo KANNO, Yukio KOIBUCHI and Masahiko ISOBE

¹学生会員 修(環) 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

²正会員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

Spatial mapping of water depth and bottom material has long been a major subject in remote sensing of shallow water. Although a number of conventional mapping algorithms are based on a simple remote-sensing-reflectance model that ignores multiple scattering and internal reflection, its validity has not been tested thoroughly. In this study, the regressive depth-prediction accuracy of the model is tested for typical optical conditions, using the direct Monte Carlo solutions of radiative transfer equation that account for all orders of multiple scattering and internal reflection. The result shows that the internal reflection causes significant dependence of the regression coefficients on the distribution of regression data, which results in poor depth-extrapolation accuracy of the model. In order to address the problem, we then theoretically derived a new reflectance model, which accounts for all orders of internal reflection. While the new model requires no more regression coefficients than the traditional model, its prediction is shown to be more accurate for a wide range of optical depths.

Key Words : Optical remote sensing, shallow water, reflectance model, internal reflection

1. はじめに

浅水域の水深・底質分布は、管理・利用・研究に欠かせない基盤情報である。現在、水深分布は主に音響機器、底質分布は底質サンプリングと目視調査によって計測されている。しかし、船舶の航走やダイバー作業を必要とするこれらの方法のみでは、十分な時空間密度の確保が難しい。水深分布に関しては航空機搭載の LIDAR による測量も普及しつつあるが、全ての浅水域に適用するには高コストである。

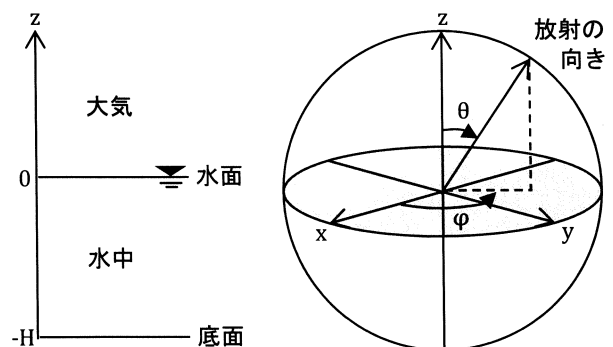
一方、サンゴ礁等の浅く清澄な水域では、可視単色光の水面直上におけるリモートセンシング反射率 $R \equiv \pi L(+0, \theta, \varphi) / E^-(+0)$ ($0 \leq \theta < \pi/2$) が、水深や底質に依存する。ここに、 $L(z, \theta, \varphi)$ は放射輝度 [$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$]、 $E^-(z)$ は下向き放射照度 [Wm^{-2}] を表す。 z, θ, φ は図-1 に示すように、水面基準の上向き鉛直座標 [m]、放射の向きの天頂角 ($0 \leq \theta \leq \pi$)、アジマス角 ($0 \leq \varphi < 2\pi$) としてそれぞれ定義される。

そこで従来、次式のような R に関するモデル (以下、反射率モデル) に基づき、衛星・航空機が観測した R から水深・底質を予測する試みが、数多く行われてきた^{1)~7)}。

$$R = R_\infty + (Tn^{-2}r_b - R_\infty)e^{-\alpha_1 H} \quad (1)$$

ここに、 R_∞ は水深が十分に大きい地点で観測される R 、 T は往復の水面透過率、 n は水の空気に対する相対屈折率、 r_b は底面反射率、 H は水深 [m]、 α_1 は r_b, H に依存しないと仮定される実効消散係数 (effective attenuation coefficient¹⁾ の本稿での和訳) [m^{-1}]、である。なお、 R に関するモデルの両辺に $E^-(+0)/\pi$ を乗じた $L(+0, \theta, \varphi)$ に関するモデルも、本稿では便宜上、反射率モデルと呼ぶ。

R の分子の $L(+0, \theta, \varphi)$ は、図-2 に例示した多様な経路をもつ成分の和である。一方、反射率モデル



(a) 鉛直座標 z (b) 天頂角 θ , アジマス角 φ
図-1 鉛直座標と角度の定義

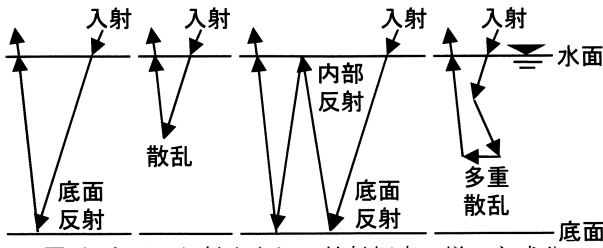


図-2 水面から射出される放射輝度の様々な成分

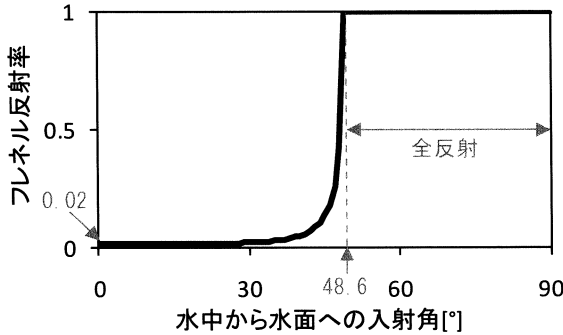


図-3 内部反射におけるフレネル反射率の入射角依存性

表-1 水域の光学条件に関する仮定

項目		仮定の内容
境界	入射光	定常・無偏光の単色光
	水面	水平面(相対屈折率 1.333)
	底面	水平な Lambert 面
水中	吸収・散乱係数	空間的に一様
	蛍光・非弾性散乱	無視

(1) は、 $L(z, \theta, \varphi)$ の分布を支配する放射伝達方程式から、水面での内部反射を経た成分（内部反射成分）の無視と、水中・底面で計2回以上の散乱・反射を経た成分（多重散乱成分）の無視または近似に基づいて導かれるモデルである。しかし、同モデルの適用例が多い一方で、成立性に関する基礎的な検証は十分に行われていない。そこで本研究では、様々な基礎的な光学条件について、放射伝達方程式のRに関する直接解を求め、反射率モデル(1)の成立性を検証する。さらにその結果に基づいて、同モデルの改良案を提示することを目的とする。

2. 放射伝達方程式と従来の反射率モデル

(1) 放射伝達方程式と境界条件

以下の説明のため、 $L(z, \theta, \varphi)$, $E^-(z)$ のうち、 m 回の底面反射と n 回の水中散乱を経た成分を、それぞれ $L_{m,n}(z, \theta, \varphi)$, $E_{m,n}^-(z)$ と定義する。但し、 m または n が負のとき、各成分は0であると定める。定義より、

$$L(z, \theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} L_{m,n}(z, \theta, \varphi) \quad (2)$$

$$E^-(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} E_{m,n}^-(z) \quad (3)$$

本研究の解析では、表-1 の仮定を満たす、単純

化された水域を考える。表-1 で、まず単色光という仮定は、直接、または波長積分を介して、可視域の任意の波長帯に適用できるような結果を得るためのものである。また、水面・底面に関する仮定は必ずしも現実的ではなく、実際には水面の波浪や底面の双方向性反射特性が、それぞれ $L(z, \theta, \varphi)$ に影響を与える。しかし、本研究で重要となる天頂向きの放射輝度に関しては、内部反射成分を除けば、これらの影響は小さいと考えられる^{8), 9)}。

表-1 の仮定の下で、水中と水面直上における放射輝度分布は、入射光の水面直上での放射輝度分布 $L_{0,0}(+0, \theta, \varphi)$ ($\pi/2 < \theta \leq \pi$) を入力として、水中の放射伝達方程式¹⁰⁾：

$$\cos\theta \frac{dL_{m,n}(z, \theta, \varphi)}{dz} = -cL_{m,n}(z, \theta, \varphi) + \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} b\tilde{\beta}(\theta', \varphi' \rightarrow \theta, \varphi) L_{m,n-1}(z, \theta', \varphi') \sin\theta' d\theta' d\varphi' \quad (4)$$

、水面におけるフレネル反射率（内部反射の場合について図-3 に示す）とスネルの法則に基づく境界条件¹⁰⁾、及び底面での反射に関する境界条件：

$$L_{m,n}(-H, \theta, \varphi) = \frac{r_b}{\pi} E_{m-1,n}^-(H) \quad \left(0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

に支配される。ここに、

- A) c は水質のみに依存する光束消散係数 (beam attenuation coefficient) [m^{-1}] であり、吸収係数 $a[m^{-1}]$ と散乱係数 $b[m^{-1}]$ の和である。
- B) $\tilde{\beta}(\theta', \varphi' \rightarrow \theta, \varphi)$ は散乱位相関数 [sr^{-1}] であり、散乱体に向き (θ', φ') で衝突した光子が、向き (θ, φ) に散乱される確率密度を表す。自然界の水中では、 $\tilde{\beta}(\theta', \varphi' \rightarrow \theta, \varphi)$ は散乱角 ψ のみに依存するので、 $\tilde{\beta}(\psi)$ と表記されることも多い。

(2) 従来の反射率モデルの導出

放射伝達方程式(4)は、一般には解析的に解けず、直接解を求める目的では、3. で触れるモンテカルロ法等の数値解法が用いられる⁹⁾⁻¹²⁾。しかし、数値解法は計算コストが大きいため、日射を光源とする水深・底質のリモートセンシングでは、反射率モデルが用いられてきた¹¹⁾⁻⁷⁾。反射率モデルは、文献によって細部が異なるが、水深・底質の予測に用いる限り、反射率モデル(1)と等価であるものが多い¹¹⁾⁻⁷⁾。反射率モデル(1)は、表-1 の仮定の下で、入射光を平行光と仮定し、さらに内部反射・多重散乱成分を無視することで、前節で示した方程式系から導くことができる。

まず、内部反射・多重散乱成分の無視は、

$$L(+0, \theta, \varphi) = L_{1,0}(+0, \theta, \varphi) + L_{0,1}(+0, \theta, \varphi) \quad (6)$$

で表される。次に、式(4) (5) と水面での境界条件を用いると、次の2式が導かれる。

$$L_{1,0}(-0, \theta, \varphi) = \frac{r_b}{\pi} e^{-c(\sec\theta_1 + \sec\theta)H} E_{0,0}^-(0) \quad (7)$$

$$L_{0,1}(-0, \theta, \varphi) = \frac{b\tilde{\beta}(\psi)}{\cos\theta_1 |\cos\psi| \left(1 + \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta}\right) c} \left(1 - e^{-c(\sec\theta_1 + \sec\theta)H}\right) E_{0,0}^-(0) \quad (8)$$

但し、式(6) (7) (8) は $0 \leq \theta < \pi/2$ に対して成り立つ

表-2 直接解を計算した光学条件

項目	数式表現	設定内容	場合の数
入射光の水面直上での放射輝度分布	$L(+0, \theta, \varphi) \left(\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi \right)$	① $\theta = \pi$ のみ非零: 直達光 (太陽高度 90°) を模擬 ② $\theta = 2\pi/3$ のみ非零: 直達光 (太陽高度 30°) を模擬 ③ 下半球の全ての向きに一樣: 天空光を模擬	3
観測の向き	-	天頂の向き	1
単一散乱アルベド	$\frac{b}{c} \left(= \frac{b}{a+b} \right)$	① 0.2: 散乱に対して吸収が卓越する水質を模擬 ② 0.8: 吸収に対して散乱が卓越する水質を模擬	2
散乱位相関数	$\tilde{\beta}(\psi)$	実測 ¹³⁾ に基づく海水の平均的な散乱位相関数 ^{10), 12)}	1
光学的深さ	cH	$10^{0.2n} (n = -10, -9, \dots, 5), \infty$	17
底面反射率	$E^+(-H)/E^-(-H)$	0.05 ~ 0.5 (0.05 刻み)	10

式である。また、 θ_i は入射光の屈折角、 ψ は入射の向きと向き (θ, φ) のなす散乱角である。

式 (6) (7) (8) と水面での境界条件を連立し、 $\alpha_1 = c(\sec \theta_i + \sec \theta)$ 等の置換を行って整理すると、反射率モデル (1) を得る。反射率モデル (1) の導出法には他に、散乱角の小さい多重散乱成分を考慮した QSS 近似を用いる方法もある²⁾。

3. 放射伝達方程式の直接解の数値計算

(1) 数値解法の概要

本研究では、放射伝達方程式の直接解を求めるために、多数の仮想的な光子の確率的挙動を追跡するモンテカルロ法を用いる。以下、その概要を述べるが、詳細は既往文献^{11), 12)}を参考にされたい。

まず、各光子を水面直上に入射させる。その後、各光子の3次元座標を、光子が水中で吸収されるか、大気中に射出されるまで追跡する。追跡の過程では、

- 吸収・散乱が生じるまでに光子が進む距離
 - 吸収・散乱のいずれが生じるか
 - 散乱が生じた場合、どの向きに散乱するか
 - 水面に達した場合、反射するか否か
 - 底面に達した場合、どの向きに反射するか
- を、表-1の仮定と次項で述べる計算条件に基づき、乱数を用いて確率的に決定する。但し底面反射率に関しては、Gordon and Brown¹¹⁾に倣い、計算時には1とし、計算後にその影響を補正する。

Rの直接解は、水面直上において、観測の向きの微小立体角範囲に射出された光子を、天頂角に依存する重みをつけて集計することで求められる。

(2) 計算条件

表-1の仮定下で、Rは表-2の各条件のみに依存する。本研究では、表-2に示した条件設定の全ての組 (計 1020 通り) について、Rの直接解を計算した。表-2の条件設定は、許容される計算コストに対して可能な限り一般的な結論が得られるよう、配慮したものである。

モンテカルロ法による計算精度は、乱数の品質と追跡する光子の数に依存する。本研究では高品質・高速な疑似乱数生成器 MT19937¹⁴⁾を採用し、条件設定の各組について、 10^8 個の光子を10グループ追

跡した。各グループについてRの直接解を計算した後、その平均によって 10^9 個の追跡に基づく直接解 R_s を与えるとともに、その不偏標準偏差と中心極限定理を用いて、 R_s の標準偏差を推定した。

4. 従来の反射率モデルの検証

(1) 反射率と内部反射成分の光学条件依存性

図-4に、表-2に示した条件設定の代表的な組について、計算された直接解 R_s 、 R_s から内部反射成分を除いた値 R'_s 、及び両者の標準偏差の推定値 (を100倍した値) の、光学的深さ依存性を示す。この図では、 R_s, R'_s に関する高い計算精度に加え、次の内容を観察できる。

- R_s, R'_s や内部反射成分の寄与 ($R_s - R'_s$) は、単一散乱アルベドに関わらず、底面反射率が大きく、光学的深さが小さい場合に大きい。この依存性は、図-4で扱った光学条件では、水中散乱よりも底面反射が、Rや内部反射成分にとって重要な過程であることを示している。
- R_s, R'_s や内部反射成分の寄与 ($R_s - R'_s$) は、光学的深さが大きい区間では、単一散乱アルベドが大きい場合に大きい。この主な原因は、自然界の水では $\tilde{\beta}(\psi)$ が $\psi = 0$ に大きなピークをもつ、即ち光子の進む向きを大きく変えない散乱が卓越することである。
- R_s, R'_s や内部反射成分の寄与は、入射光の水面直上での放射輝度分布には大きく依存しない。

(2) 実効消散係数の光学条件依存性

図-5、図-6に、太陽高度が 30° 、単一散乱アルベドが 0.8 である条件設定の組について、 R_s, R'_s を反射率モデル (1) に代入して計算された実効消散係数 $\alpha_{1s}, \alpha'_{1s}$ と c の比の、光学的深さ・底面反射率に対する依存性を例示する。水質のみに依存する c を固定して考えると、 α_{1s} の顕著な光学的深さ・底面反射率依存性、即ち反射率モデル (1) の不成立性が観察できる。具体的には、 α_{1s} は図-5から光学的深さ cH または水深 H の単調増加関数であり、図-6から底面反射率の単調減少関数である。

一方、図-5、図-6の α'_{1s} に関しては、 α_{1s} と比べて、光学的深さ・底面反射率依存性が非常に小さい。

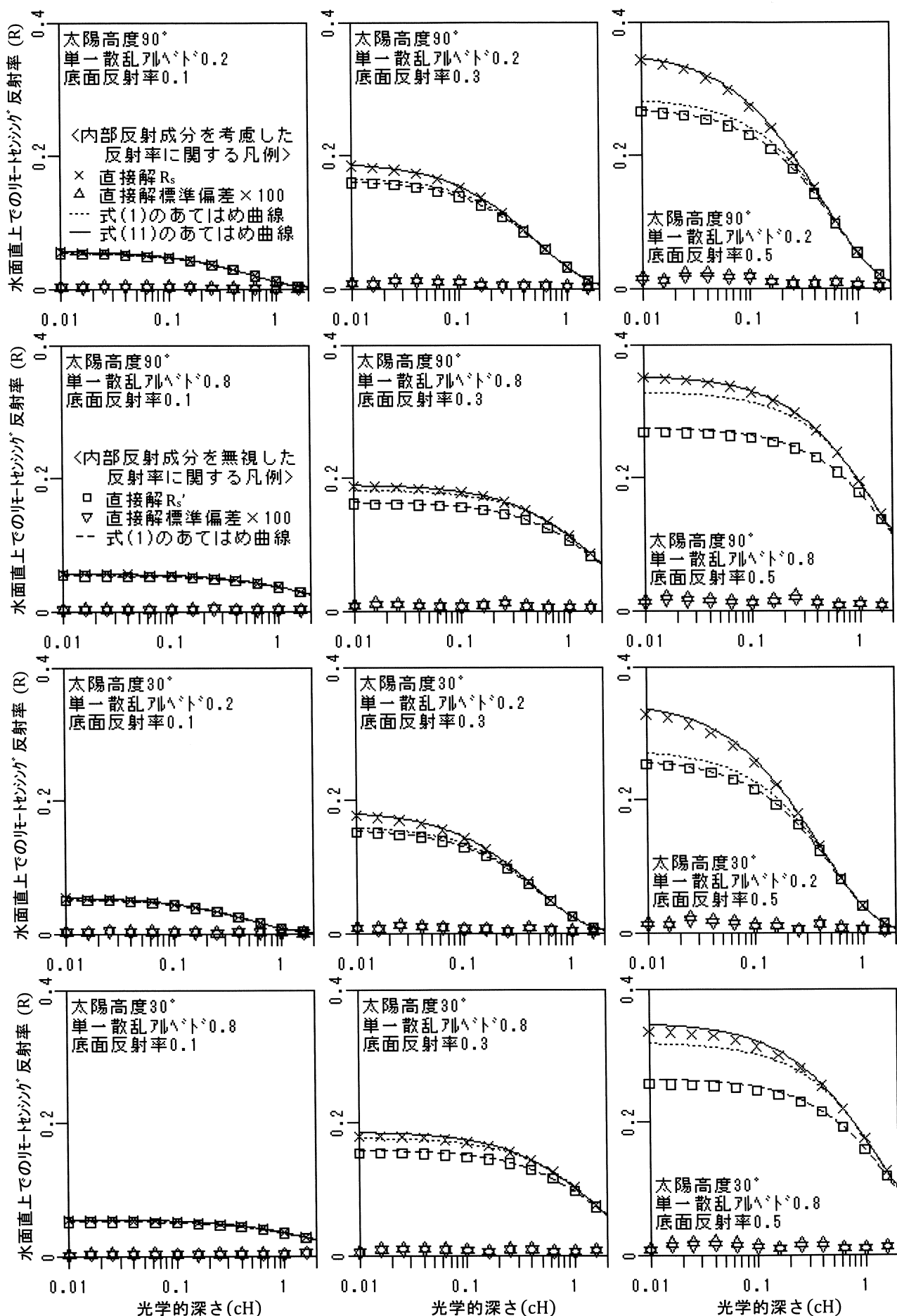


図-4 様々な光学条件における水面直上リモートセンシング反射率の直接解，標準偏差，及びモデル予測値

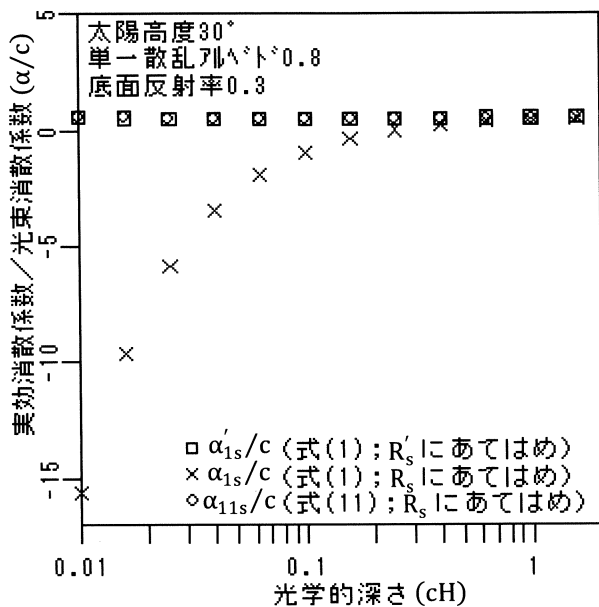


図-5 実効消散係数の光学的深さ依存性

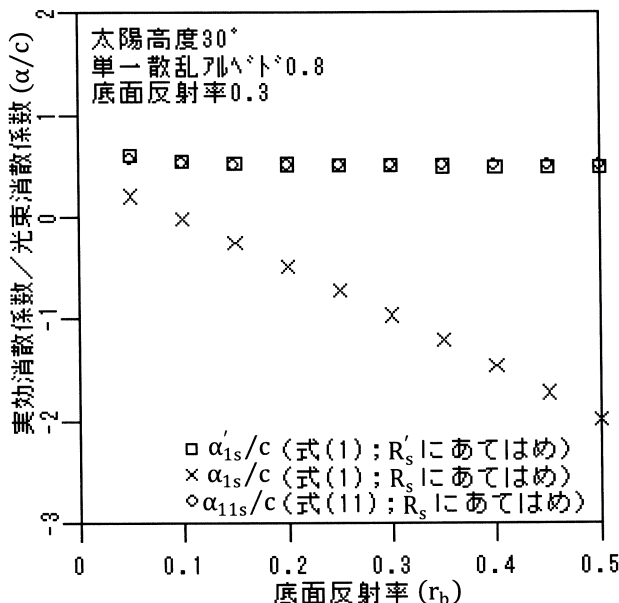


図-6 実効消散係数の底面反射率依存性

よって、 α_{1s} の底面反射率・光学的深さ依存性は、主に内部反射成分、換言すれば反射率モデル(1)における内部反射成分の無視に起因し、次の要因の重量によるものと考えられる。

- 光学的深さが小さく、底面反射率が高いほど、内部反射成分は大きい。
- 図-3 に示したように、内部反射の反射率は、観測される向きに進む、入射角が 0 に近い光子に対しては無視できるほど小さいが、入射角が大きい光子に対しては 1 に達する。
- 反射率モデル(1)では、 R_s が大きいほど、 α_{1s} は小さい。

(3) 水深の予測精度

内部反射成分の無視に起因する反射率モデル(1)

の不成立性は、水深・底質の予測精度に悪影響を与えるものと予想される。そこで本節では最も基本的な水深予測問題を例に、その影響を検討する。

本節で想定する水深予測問題は、表-2 の光学条件の中で、光学的深さ以外の条件が全て一様とみなせる状況に関するものである。この状況では、RとHの組に関する既知のデータ（以下、回帰データ）に反射率モデル(1)をあてはめ、最小二乗法等を用いて($Tn^{-2}r_b - R_\infty$)と α_1 を最適化することで、HからRを、またはRからHを予測する式が得られる^{3),4)}。

このようなあてはめの具体例として図-4 に、プロットされた(cH, R_s), (cH, R'_s)の組の中で、光学的深さが大きい 3 データ($cH = 10^{-0.2}, 10^0, 10^{0.2}$)のみにあてはめた反射率モデル(1)によるRの予測値を描画した。(cH, R'_s)にあてはめた反射率モデル(1)によるRの予測値が、全ての条件について R'_s と良く一致する一方で、(cH, R_s)の組にあてはめた反射率モデル(1)は、底面反射率が大きく、光学的深さが小さい条件下で、Rを過小評価している。この結果は、内部反射成分の無視に起因する α_1 の光学的深さ依存性によるものである。本例はまた、水深予測の視点で解釈すれば、反射率モデル(1)では、Rに対する内部反射成分の寄与が回帰データと異なるような水深帯を、正確に予測できないことを示す例である。

なお、 R_s の過小評価が、単一散乱アルベドが大きい場合に顕著である現象は、4. (1)で触れた、 $\tilde{\beta}(\psi)$ が $\psi = 0$ に大きなピークをもつ事実に起因する。

5. 内部反射を考慮した新しい反射率モデル

(1) 放射伝達理論に基づく導出

4. で明らかになった、内部反射成分の無視に起因する反射率モデル(1)の問題点を踏まえ、内部反射成分を考慮した新しい反射率モデルを導出する。但し、モデルの成立性と簡単さのバランスを考え、水中散乱を経た内部反射成分を無視し、水中散乱を経ずにk回($k = 1, \dots, \infty$)の底面反射とk-1回の内部反射を経た成分のみを考慮する。即ち、このモデルでは、式(6)の代わりに、 $0 \leq \theta < \pi/2$ に対して次式を仮定する。

$$L(+0, \theta, \varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} L_{k,0}(+0, \theta, \varphi) + L_{0,1}(+0, \theta, \varphi) \quad (9)$$

まず、式(4)(5)と水面での境界条件を用いると、 $0 \leq \theta < \pi/2$ に対して次式が導かれる。

$$\frac{L_{k,0}(-0, \theta, \varphi)}{L_{k-1,0}(-0, \theta, \varphi)} = \frac{E_{k,0}^-(H)}{E_{k-1,0}^-(H)}$$

$$= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} F(\theta') \frac{r_b}{\pi} e^{-2 \sec \theta' cH} \cos \theta' \sin \theta' d\theta' d\varphi' \quad (10)$$

但し、 $F(\theta')$ は入射角 θ' に関する内部反射のフレネル反射率（図-3）である。式(10)の最右辺は、解析的には扱い難いが、数値的には cH の指数関数である $c_0 r_b e^{-2(\sec \theta_1 + \sec \theta) cH}$ によって良く近似できる。ここで、 $c_0 \sim 0.475$ は定数である。また、式(9)に含ま

れない θ_i を用いる理由は、解析的扱いの便利のためである。この近似を適用した式(10)を、式(7)(8)(9)、及び水面での境界条件と連立して解き、適当な置換を行って整理すると、次式の新しい反射率モデルが得られる。

$$R = R_{\infty} + \left(\frac{Tn^{-2}r_b}{1 - c_0r_b e^{-2\alpha_{11}H}} - R_{\infty} \right) e^{-\alpha_{11}H} \quad (11)$$

但し、 $\alpha_{11} = (\sec \theta_i + \sec \theta) c$ は新しい反射率モデルにおける実効消散係数である。

反射率モデル(11)は、反射率モデル(1)と比較して、分数関数を含んでおり複雑に見える。しかし例えば、4.(3)で想定した水深の回帰予測問題に適用した場合、回帰係数は r_b, α_{11} のみであり、反射率モデル(1)と同数である。加えて反射率モデル(11)は、 $e^{-\alpha_{11}H}$ に関する3次方程式への変形や、その解を用いたHの陽的表現等、ある程度の解析的な扱いが可能である。これらは、反射率モデル(11)を回帰モデルとして応用する上で、好ましい性質である。

(2) 実効消散係数の光学条件依存性

図-5、図-6に、 R_s を用いて計算された反射率モデル(11)の実効消散係数 α_{11s} について、 c に対する比の、光学的深さ・底面反射率依存性を併せて示す。 c を固定して考えると、 α_{11s} は、反射率モデル(1)の実効消散係数 α_{1s} と比較して、光学的深さ・底面反射率依存性が遥かに小さい。この結果は、反射率モデル(11)のより高い成立性を示し、同モデルがより高い水深・底質の予測精度をもつことを示唆する。

(3) 水深の予測精度

図-4に、4.(3)と同様に、プロットされた(cH, R_s)の組の中で、光学的深さが大きい3データのみにあてはめた反射率モデル(11)を併せて示す。反射率モデル(11)は、反射率モデル(1)と異なり、底面反射率が大きい条件設定の組の、光学的深さが小さい区間でも、 R_s とよく一致していることがわかる。この例のように反射率モデル(11)は、内部反射成分の寄与が回帰データと異なるような水深帯をも正確に予測することができる。

6. まとめ

本研究では、日射を光源とした浅水域の水深・底質リモートセンシングに用いられる可視単色光の反射率モデルに関して、以下の結論・成果を得た。

- A) 従来の反射率モデル(1)は、内部反射成分を無視しているため、底面反射率が大きく、光学的深さが小さい条件下で十分に成立しない。従って、例えば同モデルを水深の回帰予測に用いた場合、内部反射成分の寄与が回帰データと異なるような水深帯を正確に予測することができない。
- B) 放射伝達理論に基づき、水中散乱を経ない内

部反射成分を考慮した新しい反射率モデル(11)を導出した。新しいモデルは、従来のモデルと異なり、底面反射率・光学的深さに関わらず良く成立する。結果として、水深の回帰予測に用いた場合、回帰係数は従来のモデルと同数であるにも関わらず、より高精度な水深予測が可能である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費（課題番号：19686032、研究代表者：鯉渕幸生（東京大学大学院）により実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Philpot, W. D. : Bathymetric mapping with passive multispectral imagery, *Applied Optics*, Vol.28, pp.1569-1578, 1989.
- 2) Lyzenga, D. R. : Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, *Applied Optics*, Vol.17, pp.379-383, 1978.
- 3) Paredes, J. M. and Spero, R. E. : Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption, *Applied Optics*, Vol.22, pp.1134-1135, 1983.
- 4) Darkwah, S. O., Deguchi, C., Sugio, S., and M. Kunitake : A simple method of estimating water depth at the nearshore zone from satellite data, *日本リモートセンシング学会誌*, Vol.18, pp.13-27, 1998.
- 5) 鈴木健太郎, 泉宮尊司, 石橋邦彦 : 衛星リモートセンシングによる砂浜海岸の高精度水深推定法とその適用性に関する研究, *海岸工学論文集*, Vol.49, pp.1521-1525, 2002.
- 6) Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., and Tanis, F. J. : Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol.44, pp. 2251-2259, 2006.
- 7) 神野有生, 鯉渕幸生, 竹内渉, 磯部雅彦 : 光学理論モデルのセミパラメトリック表現に基づく汎用水深分布予測法, *日本リモートセンシング学会誌*, 印刷中.
- 8) Gordon, H. R. : Normalized water-leaving radiance: revisiting the influence of surface roughness, *Applied Optics*, Vol.44, pp. 241-248, 2005.
- 9) Mobley, C. D., Hao, Z., and Voss, K. J. : Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Bidirectional reflectance distribution function effects, *Limnology and Oceanography*, Vol.48, pp.337-345, 2003.
- 10) Mobley, C. D. : *Light and Water : Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, 1994.
- 11) Gordon, H. R. and Brown, O. B. : Influence of Bottom Depth and Albedo on the Diffuse Reflectance of a Flat Homogeneous Ocean, *Applied Optics*, Vol.13, pp.2153-2159, 1974.
- 12) Mobley, C. D., Gentili, B., Gordon, H. R., Jin, Z., Kattawar, G. W., Morel, A., Reinersman, P., Stamnes, K., and Stavn, R. H. : Comparison of numerical models for computing underwater light fields, *Applied Optics*, Vol.32, pp.7484-7504, 1993.
- 13) Petzold, T. J. : *Volume scattering functions for selected ocean waters*, Scripps Institution of Oceanography, 1972.
- 14) Matsumoto, M. and Nishimura, T., Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulations*, Vol.8, pp.3-30, 1998.