

浅水域における各種消散係数の光学条件依存性

Dependence of Attenuation Coefficients on Optical Condition of Shallow Water

神野有生¹・鯉渕幸生²・磯部雅彦³

Ariyo KANNO, Yukio KOIBUCHI and Masahiko ISOBE

Radiative transfer of visible light in optically shallow water is an important process for remote sensing and environmental research. It has been modeled using various attenuation coefficients. Although these coefficients are apparent optical properties (AOPs) of water, which are supposed to be dependent not only on the water quality but on other optical conditions (e.g. water depth, bottom albedo and distribution of incident radiance), the dependencies have not been well understood. In this study, 4 practical attenuation coefficients are analyzed and semiempirically modeled, based on the Monte Carlo radiative transfer simulations under idealized optical conditions. We found their diverse dependencies on the optical conditions.

1. はじめに

光学的に浅い水域では、図-1のように、水面に入射した太陽由来の可視光が、水中における吸収・散乱のみならず、底面反射、水面での内部反射を経て伝搬し、複雑な水中光環境を形成する。このような放射伝達過程において、水面直下における上・下向き放射照度 $E_u(0), E_d(0)$ と天頂向きの放射輝度 $L_u(0)$ 、及び水深 H の底面直上における上・下向き放射照度 $E_u(H), E_d(H)$ は、底質・水深・水質のリモートセンシングや、熱輸送・光合成過程の研究等において特に重要な放射量であり、表-2に示すような放射伝達モデルを用いて解析されてきた(例えば、Lyzena, 1978; Philpot, 1989; Maritorenaら, 1994; Leeら, 1998; Ohdeら, 2001; Albertら, 2003; Lyzenaら, 2006)。ここで、文字変数は表-1に定義しており、放射量の添字の ∞ は無限水深での値を表す。

表-2の放射伝達モデルでは、各種の消散係数が用いられている。これらは、水質のみで決まる、即ち水の固有光学特性 (inherent optical properties) である光束消散係数 c 、単一散乱アルベド ω_0 、散乱位相関数 β 等に加え、底質の反射特性、水深、入射光の放射輝度の方向分布等、他の様々な光学条件に依存する見かけの光学特性 (apparent optical properties) である。しかし、このような多数の光学条件に対する各種消散係数の依存性は、十分に定式化されていない。そのため各種消散係数は、各応用場面で、放射量の現地観測等に基づいて帰帰的・経験的に定められているのが現状である。さらに国内では、各種消散係数を、光束消散係数 c 等と混用した例が散見

される。

そこで本研究では、まず様々な基本的な光学条件について、放射伝達過程の数値計算に基づいて各種消散係数を求める。その結果を用いて、各種消散係数と光学条件との関係を解析・モデル化することで、各種消散係数のより合理的・理論的な応用に貢献することを目的とする。

表-1 本稿で用いる主な文字変数の定義

文字変数	単位	名称・定義
a, b	m^{-1}	吸収・散乱係数
c	m^{-1}	光束消散係数($\equiv a + b$)
ω_0	無次元	単一散乱アルベド($\equiv b/c$)
β	sr^{-1}	散乱位相関数
$B(\beta)$	無次元	後方散乱確率
r_b	無次元	底面アルベド($\equiv E_u(H)/E_d(H)$)
H	m	水深
ζ	無次元	光学的深さ($\equiv cH$)
θ_s, θ_w	度	水面入射角, 水中屈折角
$L_u(z)$	$Wm^{-2}sr^{-1}$	水深 z での天頂向きの放射輝度
$E_u(z), E_d(z)$	Wm^{-2}	水深 z での上・下向き放射照度

表-2 各種の放射伝達モデルと、対応する消散係数

放射伝達モデル	消散係数
$E_d(H) = E_d(0)\exp(-K_dH)$	$K_d [m^{-1}]$
$E_u(0) = E_u(H)\exp(-\kappa H)$ $+ E_{usc}(0)(1 - \exp(-(\kappa_d + \kappa)H))$	$\kappa [m^{-1}]$
$\frac{E_u(0)}{E_d(0)} = \frac{E_{usc}(0)}{E_d(0)} + \left(r_b - \frac{E_{usc}(0)}{E_d(0)} \right) \exp(-2KH)$	$K [m^{-1}]$
$\frac{L_u(0)}{E_d(0)} = \frac{L_{usc}(0)}{E_d(0)} + \left(\frac{r_b}{\pi} - \frac{L_{usc}(0)}{E_d(0)} \right) \exp(-2kH)$	$k [m^{-1}]$

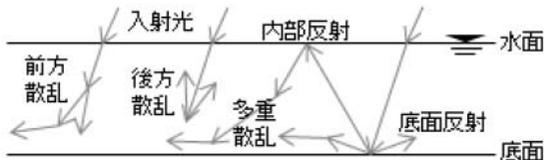


図-1 光学的に浅い水域における放射伝達過程の模式図

1 学生会員 修(環) 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
 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社会文化環境学専攻
 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社会文化環境学専攻

2. 各種消散係数の数値計算

(1) 放射伝達モデルと各種消散係数に関する注意点

表-2の放射伝達モデルの中で、水面直下における上向き放射照度 $E_u(0)$ に関するモデルでは、第1項が底面反射成分を、第2項が水中散乱成分を、同一の消散係数 κ で表現している。また、放射照度の反射率 $E_u(0)/E_d(0)$ に関するモデルは、 $E_d(H), E_u(0)$ に関するモデル、及び底面アルベドの定義(表-1)から導かれるモデルであり、

$$K = (K_d + \kappa) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つ。従って3.以降の解析・モデル化では、 K を表立って扱わない。さらに $L_u(0)$ が、 $E_d(H)$ に由来する底面反射成分を含むことを考慮すると、 k が K_d に強く影響されることは自然であり、以下、特に着目しない。

(2) 計算条件

入射光を単色平行光に分解し、水域の光学条件に関して表-3の仮定を置けば、各種消散係数と光束消散係数の比は、表-4の光学条件のみに依存する。本研究ではこの一般性を活用するため、表-3の仮定下で表-4に示した網羅的な条件設定を行い、全32000組の条件について、各種消散係数を計算した。但し3.以降では、計算精度、及び応用上の重要性の観点から、光学的深さが $10^{0.2n}$ ($n = -5, \dots, 2$)の計16000組の計算結果のみを扱った。

表-4で、まず単一散乱アルベド ω_0 ($\equiv b/c$)は、0に近いほど吸収が、1に近いほど散乱が卓越する水質を表す。また、散乱位相関数 β は散乱角の確率密度関数であり、本研究では実測に基づく β として、Mobleyら(1993)が示した1種類(Mob)、及びHaltrinら(2002, 2004)が回帰式を提示した4種類(M01, M10, M18, P02)の、計5種類を用いた。これらを図-2に示すが、自然水の β はこのように、散乱角の小さい前方に大きなピークをもつという類似性をもつ(Mobley, 1994)。結果として β の形状は概ね、図中に示した後方散乱確率 B で特徴付けられる(Kokhanovsky, 2006)。

(3) 数値計算法

まず、水面直下・底面直上における放射輝度分布、及び上向き・下向きの放射照度を、モンテカルロ法で計算した。次に、その結果を表-2のモデルに代入して、各種消散係数を求めた。モンテカルロ法は、放射伝達過程の直接解法の1種であり、多数の仮想的な光子の確率的挙動を追跡する方法である。以下、その概要を述べるが、詳細はGordonら(1974)、Mobleyら(1993)を参照されたい。

最初に各光子を、水面直上に入射させた。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した。追跡の過程では、

1. 吸収・散乱が生じるまでに光子が進む距離。

2. 吸収・散乱のいずれが生じるか。
3. 散乱が生じた場合、どの向きに散乱するか。
4. 水面に達した場合、反射するか否か。
5. 底面に達した場合、どの向きに反射するか。

を、表-3の仮定と(2)で説明した計算条件に基づき、乱数を用いて確率的に決定した。但し底面反射率に関しては、Gordonら(1974)に倣い、光子の追跡時には1とし、後にその影響を補正した。水面直下・底面直上における放射輝度・放射照度は、これらの水平面を通過する光子を記録し、適切に集計することで求めた。

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MT19937(Matsumotoら, 1998)を採用し、条件設定の各組について108個の光子を追跡した。

3. 各種消散係数の光学条件依存性に関する解析

(1) 単一散乱アルベドに対する依存性

図-3に例示するように、各種消散係数と光束消散係数

表-3 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	単色平行光
	水面	水平面
	底面	水平なLambert面
水中	水質	空間的に一定
	偏光・蛍光・非弾性散乱	無視できる

表-4 放射伝達計算を行った光学条件

項目	設定内容
単一散乱アルベド(ω_0)	0.1~0.9 (0.2刻み)
散乱位相関数(β)	実測に基づく5種類
底面アルベド(r_b)	0.05~0.8 (0.05刻み)
光学的深さ(ζ)	$10^{0.2n}$ ($n = -10, \dots, 5$)
入射光の水面入射角(θ_c)	0~80° (20°刻み)

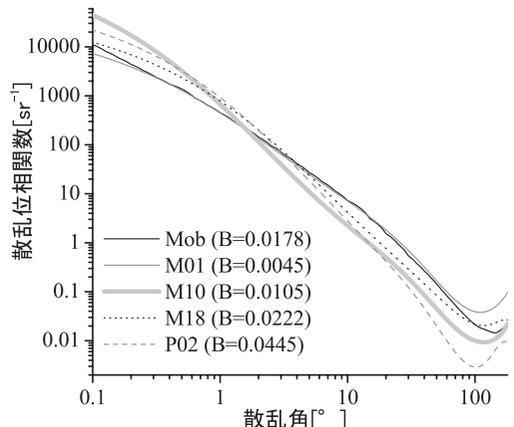


図-2 放射伝達計算に用いた散乱位相関数と後方散乱確率 B

の比は、単一散乱アルベド ω_0 の増加とともに大きく減少する傾向を示した。この関係は線形性が強く、他の光学条件を固定した3200組について、 K_d/c , κ/c , k/c と ω_0 の相関係数は、平均でそれぞれ-0.9998, -0.9992, -0.9957に達し、特に K_d/c に関しては全ての組で-0.9985を下回った。これは、2. (2) で触れ、図-2にも示したように、自然水中での散乱は光子の進む向きを殆ど変えない確率が大きく、吸収と比べて放射量の消散への寄与が小さいためである。

(2) 散乱位相関数に対する依存性

図-4に、各種消散係数と光束消散係数の比の、散乱位相関数の後方散乱確率 B に対する依存性を例示する。いずれの散乱位相関数に関しても B は小さいため、 B による K_d/c , κ/c , k/c の絶対値の変化は大きくないが、両者には正の相関が認められた。特に K_d/c と B の間の相関係数は、他の光学条件を固定した3200組の平均で0.974を超えた。また、図-4に記入した回帰直線の傾きからもわかるように、 B への依存性は、単一散乱アルベド ω_0 が大きい条件下でより顕著である。

これらの傾向は、散乱の際、 B が大きいほど、光子の向きが平均的に大きく変わり、放射量が大きく減少するためであると解釈できる。実際に、光学的に深い水域では、散乱の寄与を、 B と散乱係数 b の積で表した K_d のモデル：

$$K_d \propto a + Bb = \{(1 - \omega_0) + B\omega_0\}c \dots\dots\dots (2)$$

が提案されてきた (Smithら, 1981; Sathyendranathら, 1988)。以上の考察から、光学的に浅い水域でも、式 (2) と同様に $B\omega_0$ を用いたモデル化が可能だと考えられる。

(3) 底面アルベドに対する依存性

a) K_d, k の底面アルベド依存性

図-5に例示するように、 K_d/c と、その影響が強い k/c は、光学的深さ ζ が小さい条件下で、底面アルベド r_b とともに顕著に増加する傾向を示した。特に K_d/c と r_b の間には、他の光学条件を固定した1625組全てについて、相関係数の絶対値が0.9993を超える強い線形関係が見出された。上記の傾向は、次の機構によるものと考えられる。

まず、水面直下における下向き放射照度 $E_d(0)$ は、水面上から入射した直後の成分と、水面における内部反射を経た成分から構成される。いま、 ζ が小さい条件下で r_b が増加すると、前者に対する後者の割合が増加する (神野ら, 2009)。ここで、内部反射におけるフレネル反射率は、入射角が大きいほど大きい。よって、内部反射を経た $E_d(0)$ の成分は、入射直後の成分と比べて、平均的により鉛直から傾いた放射輝度で構成され、単位鉛直距離を下るために進む距離、結果として消散する割合が大きい。その成分が増加する結果、消散係数 K_d が大きくなる。

b) κ の底面アルベド依存性

κ/c は図-5のように、 r_b とともに増加し、一定値に漸近する傾向を示した。この傾向は、表-2の $E_u(0)$ に関するモデルにおいて、実際には底面反射成分・水中散乱成分の消散係数が異なることが原因であると考えられる。

いま、2つの消散係数をそれぞれ κ_B, κ_C として区別し、 $E_u(0)$ のモデルを $E_d(H)$ に関するモデル、及び底面アルベドの定義 (表-1) と連立して解くと、次式を得る。

$$e^{-\kappa H} = e^{-\kappa_B H} + \frac{(E_{u\infty}(0)/E_d(0))(e^{-\kappa_B H} - e^{-\kappa_C H})}{r_b - (E_{u\infty}(0)/E_d(0))} \dots (3)$$

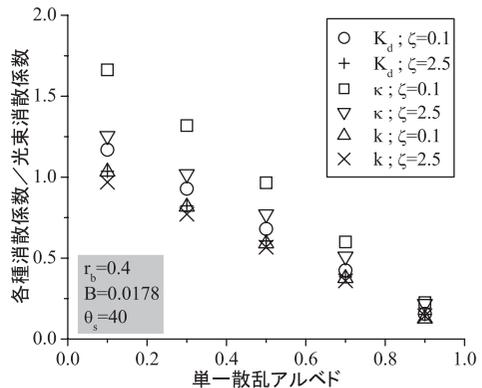


図-3 各種消散係数の単一散乱アルベド依存性

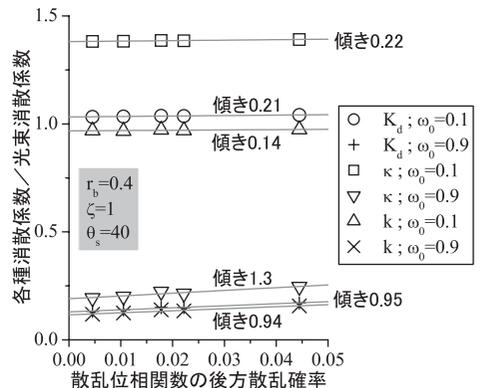


図-4 各種消散係数の後方散乱確率依存性と回帰直線

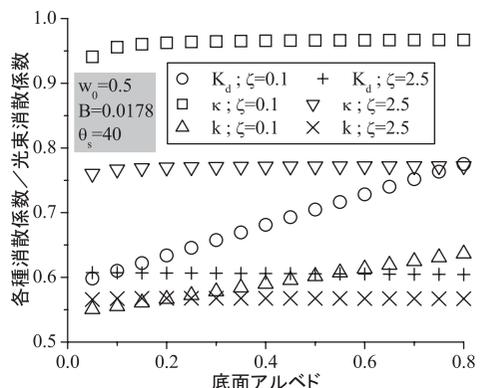


図-5 各種消散係数の底面アルベド依存性

上向き放射照度の水中散乱成分は、底面反射成分と比べて平均的に鉛直から大きく傾いた放射輝度で構成されるため、一般に κ_B は κ_C より小さい (Maritorenら, 1994)。また、本研究の数値計算では光学条件を網羅的に設定し、暗色の底質に対応する光学条件($r_b=0.05$)も扱ったが、16000組中168組を除いて、 r_b は無限水深の水面直下における放射照度の反射率 $E_{u\infty}(0)/E_d(0)$ より大きい結果となった。以上から、通常、式(3)の右辺第2項は正、ゆえに $e^{-\kappa H} > e^{-\kappa_B H}$ である。他の光学条件を固定して r_b を増加させると、右辺第2項が減少し、 $e^{-\kappa H}$ は大きい側から $e^{-\kappa_B H}$ に接近する。このとき、 κ は小さい側から κ_B に接近、つまり増加することになる。さらに、式(3)を対数化して r_b で微分すれば、 $\partial\kappa/\partial r_b$ が r_b の単調減少関数であることが示され、 κ が r_b に漸近する性質が理解できる。

(4) 光学的深さに対する依存性

a) K_d, k の光学的深さ依存性

図-6に例示するように、 K_d/c ないし、その影響が強い k/c は、底面アルベド r_b が大きい条件において、光学的深さが小さい区間のみで、 ζ の増加とともに減少する傾向を示した。これは、上述の内部反射を経た成分が、 ζ の増加とともに急減する (神野ら, 2009) ことに帰着できる。

b) κ の光学的深さ依存性

κ/c は図-6のように、 ζ の全区間で、 ζ の増加に伴い減少する傾向を示した。これは次のように解釈できる。

ある光源で発生した放射照度が、均質な水中を鉛直に伝搬する際、光源から離れるにつれ、放射輝度分布が水質固有の分布に漸近する (Kirk, 1989; Mobley, 1994)。鉛直から大きく傾いた放射輝度成分ほど優先的に消散するので、この分布は、等方的な分布と比べて、平均的に鉛直に偏っている。上向き放射照度のうち、底面反射成分に関しては、表-3に示したLambert面の仮定により、光源(底面)における放射輝度分布は完全に等方的である。一方、水中の各鉛直位置で生成する水中散乱成分は、生成時には平均的に水平に偏った放射輝度分布をもつ (Kirk, 1989; Maritorenら, 1994)。よって、底面反射成分・水中散乱成分はともに、上向きに伝搬するに従い、平均的により鉛直に近い放射輝度分布となり、単位鉛直距離当たりの消散の割合が小さくなる。ゆえに、鉛直伝搬距離が大きい、即ち ζ が大きいほど、鉛直平均の消散係数 κ_B と κ_C 、結果として κ が小さくなるのである。

(5) 入射光の水面入射角に対する依存性

入射光の水面入射角 θ_s は、表-3の仮定の下で、入射光が初期に水中で、単位鉛直距離を下るために進む距離 $\sec\theta_w$ (入射光の水中屈折角の正割) を一意に与える。光学的に深い水域では、 K_d/c と $\sec\theta_w$ が概ね比例することが知られている (Sathyendranathら, 1988)。そこで図-7に、各種消散係数と光束消散係数の比の、 $\sec\theta_w$ に対する依存性を

を例示した。この図のように、 K_d/c 、及びその影響の強い k/c は、 $\sec\theta_w$ とともに増加する傾向をもち、特に K_d/c と $\sec\theta_w$ の相関係数は、他の光学条件を固定した3200組全てについて、常に0.9995を超えた。

4. 各種消散係数の光学条件依存性に関するモデル化

(1) モデルの式形

3における観察・考察に基づき、表-4の光学条件に対する各種消散係数の依存性を、次式でモデル化した。

$$K_s = m_1 c \{ (1 - \omega_0) + m_2 B \omega_0 \} \times \left(1 + m_3 \sec\theta_w + \frac{m_4 r_b}{\zeta + m_5} + m_6 \omega_0 \right) \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 K_s は K_d 、 κ または k を代表するが^s、 κ の場合のみ、 r_b を1に置き換えることとする。また、 m_i ($i=1, \dots, 6$) は消散係数ごとに異なる定係数である。式(4)の式形は、3で明らかにした K_d, κ, k の光学条件 (及びその相乗効果) に対する依存性を、明確かつ簡単に表現可能である。3と照合して確認されたい。さらにこの式形は、光学的に深い水域の K_d に関して開発されてきた既存のモデ

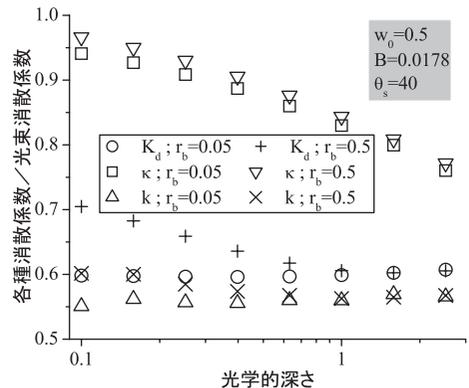


図-6 各種消散係数の光学的深さ依存性

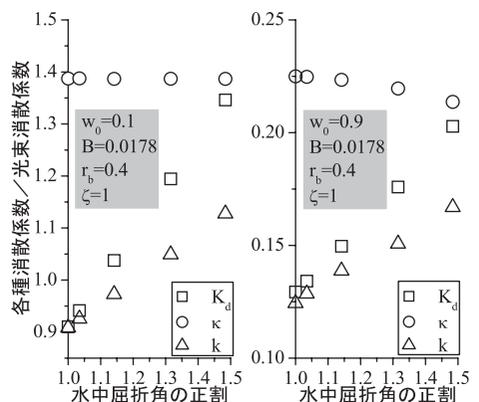


図-7 各種消散係数の入射光の水中屈折角依存性

ル (Smithら, 1981; Sathyendranathら, 1988; Leeら, 2005) との共通点も有する. なお, $m_6\omega_0$ は, 多重散乱の非線形的な寄与を表現するために追加した項である.

(2) 各種消散係数の計算結果へのモデルの当てはめ

それぞれの消散係数について, 式 (4) を2.の計算結果に当てはめ, 最小二乗法で係数 m_i ($i=1, \dots, 6$) を求めた. その結果を表-5に示す. 但し, 上向きの放射量に関係する κ, k については, モンテカルロ法の特長上, 底面アルベド r_b が小さい場合に計算精度が低下したため, $r_b \geq 0.2$ の13000通りの光学条件についてのみ当てはめた. 決定係数は概ね0.999に達し, 簡単ながら精度の高いモデルが構築できた. 本モデルは, 各種消散係数の光学条件依存性の理解に役立つだけでなく, 光学条件に基づく各種消散係数の見積もり, 光学条件の逆推定等に応用可能である.

5.まとめ

光学的に浅い水域における, 可視光放射伝達モデルの各種消散係数が, 光束消散係数・単一散乱アルベド等の水の固有光学特性に加え, 底質・水深・入射光等の光学条件に対し, 互いに異なり, かつ無視できない依存性をもつことを明らかにした. この結果は, 各種消散係数や光束消散係数を正しく区別し, 光学条件を考慮して利用することの重要性を主張するものである.

さらに, 各種消散係数の光学条件依存性を, 明確・簡単かつ高精度にモデル化することに成功した. 今後, このモデルの応用による, リモートセンシング, 熱収支・光合成過程の解析等の精緻化・高精度化が期待される. 本研究では結果の一般化のため, 水面・底面・水質に関して表-3の仮定を置いたが, モデルの実用のためには, これらの仮定が十分成立しないような現場における適用性について, 検証を行う必要があるだろう.

謝辞: 本研究の一部は, 科学研究費 (課題番号: 19206053) により実施した. ここに記して深謝します.

表-5 各種消散係数に関するモデル (式 (4)) の係数

	K_d	κ	k
m_1	0.03110	1.22164	0.52081
m_2	1.04397	0.90469	0.98495
m_3	30.66777	-0.00603	0.90818
m_4	1.86974	0.45926	0.05516
m_5	0.04283	0.86839	0.04647
m_6	3.34214	0.19722	0.12338
決定係数(R^2)	0.99893	0.99931	0.99937
残差平方平均平方根(RMSR)	0.01173	0.01197	0.00794

参考文献

- 神野有生・鯉淵幸生・磯部雅彦 (2009) : 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, 海洋開発論文集, Vol.25, 印刷中.
- Albert, A. and C.D.Mobley (2003) : An analytical model for subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-2 waters, *Optics Express*, Vol.11, pp.2873-2890.
- Gordon, H.R. and O.B.Brown (1974) : Influence of bottom depth and albedo on the diffuse reflectance of a flat homogeneous ocean, *Applied Optics*, Vol.13, pp.2153-2159.
- Haltrin, V.I. and V.I.Mankovsky (2002) : Analytical representation of experiment light scattering phase functions measured in seas, oceans and Lake Baykal, *Proc.IEEE Int.Geosci.Remote Sens. Symp.*
- Haltrin, V.I. (2004) : Analytical approximations to seawater optical phase functions of scattering, *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability*, *Proc. SPIE*, Vol.5544, pp.356-363.
- Kokhanovsky, A.A. (2006) : *Light Scattering Reviews: Single and Multiple Light Scattering*, Springer, p.459.
- Kirk, J.T.O. (1989) : The upwelling light stream in natural waters, *Limnol.Oceanogr.*, Vol.34, pp.1410-1425.
- Lee, Z.-P., K.L.Carder, C.D.Mobley, R.G.Steward and J.S.Patch (1998) : Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model, *Applied Optics*, Vol.37, pp.6329-6338.
- Lee, Z.-P., K.-P.Du, and R.Amone (2005) : A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance, *J.Geophys. Res.*, Vol.110, pp.C02016.1-C02016.10.
- Lyzenga, D.R. (1978) : Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, *Applied Optics*, Vol.17, pp.379-383.
- Lyzenga, D.R., N.P.Malinas and F.J.Tanis (2006) : Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE Trans.Geosci. Remote Sens.*, Vol.44, pp.2251-2259.
- Maritorena, S., A.Morel, and B.Gentili (1994) : Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo, *Limnol.Oceanogr.* Vol.39, pp.1689-1703.
- Matsumoto, M. and T.Nishimura (1998) : Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans.on Modeling and Computer Simulations*, Vol.8, pp.3-30.
- Mobley, C.D., B.Gentili, H.R.Gordon, Z.Jin, G.W.Kattawar, A.Morel, P.Reinersman, K.Stammes, and R.H.Stavn (1993) : Comparison of numerical models for computing underwater light fields, *Applied Optics*, Vol.32, pp.7484-7504.
- Mobley, C.D. (1994) : *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, 592p.
- Ohde, T. and H.Siegel (2001) : Correction of bottom influence in ocean colour satellite images of shallow water areas of the Baltic Sea, *Int.J.Remote.Sens.* Vol.22, pp.297-313.
- Philpot, W.D. (1989) : Bathymetric mapping with passive multispectral imagery, *Applied Optics*, Vol.28, pp.1569-1578.
- Sathyendranath, S. and T.Platt (1988) : The spectral irradiance field at the surface and in the interior of the ocean: a model for applications in oceanography and remote sensing, *J.Geophys.Res.* Vol.93, pp.9270-9280.
- Smith, R.C. and K.S.Baker (1981) : Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm), *Applied Optics*, Vol.20, pp.177-184.