土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 66，No.1，2010，1026-1030

リモートセンシングによる浅水域のSS・クロロフィル同時推定

Simultaneous Estimation of SS and Chlorophyll in Shallow Water through Remote Sensing

作野裕司[1]・神野有生[2]・鯉渕幸生[3]

Yuji SAKUNO, Ariyo KANNO and Yukio KOIBUCHI

The simultaneous estimation of SS and Chlorophyll-a (Chl.a) in shallow water through remote sensing was tried in this study. Lake Teganuma located in Chiba Prefecture was selected as a test site. Twelve spectral reflectance / Chl.a data sets were acquired using outboard boat in the lake on 28 May 2009 and 22 Oct. 2008. These data sets were related to SS or Chl.a using a simple single band or two band ratio models. As a result, a statically significant correlation was observed between “a reflectance of the simulated ALOS/AVNIR-2 Band 4 (760-890nm)” and “SS”, or “reflectance ratio of the simulated AVNIR-2 band 3 (610-690nm) and band 4” and “Chl.a”. These models were validated though the ALOS/AVNIR-2 data and the buoy data set on 20 May 2008 and 28 Oct. 2009.

1. はじめに

浅水域の環境情報の把握は生物多様性の保護や管理等にとって非常に重要である．また浅水域では時空間的な環境変化が大きいため，広域的・同時的な環境情報の把握が求められている．そのため近年リモートセンシングによる浅水域の環境情報（特に光学的特性）の把握に関する研究が試みられている（神野ら，2009a，神野ら，2009b）．一方，浅水域の水質環境情報の把握として，衛星データによる水質分布把握も期待される．ただし一般に衛星センサから外洋の植物プランクトンが持つクロロフィルa（Chl.a）の推定は実用段階であるが，無機懸濁物質（SS）の多い浅水域におけるSS・Chl.aの同時推定は非常に難しく，専用のセンサもなかった．

そこで筆者らはSS・Chl.aとも比較的高い浅水域の宍道湖（島根県）や中海（鳥取県・島根県）において，衛星リモートセンシングによる水質リモートセンシング研究を行ってきた（例えば作野ら，1999；作野ら，2003）．その結果，SPOT，Landsat等に搭載されている高解像度（数10m解像度）の可視・近赤外センサを使って，アオコ発生時や一定期間のChl.aをモニタリングすることに成功している．しかしながら，これらの結果は宍道湖・中海のみにおける結果であり，他の水域における実験や比較はされていない．また，このような衛星センサは量子化が通常8ビットであるため，宍道湖・中海のような湖内の濃度差が通常時（アオコや赤潮発生時以外）に小さい（湖内の水平濃度差は通常SSで10mg/l程度，Chl.aで10μg/l）水域において，濃度差の大きいデータセット（湖内の水平濃度差がSSで50mg/l程度，Chl.aで100μg/l程度を想定）を得るためには，長期間にわたる衛星同期水質観測が必要である．したがって同水域と同様な水質環境の湖において，リモートセンシングによるSS・Chl.aの同時推定研究を行うには限界がある．さらに，高解像度の衛星センサは海色センサのようにほぼ毎日観測されている衛星と違い，1カ月に2回程度の観測が基本であり，雲のない画像取得とそれと同期した水質観測データを得ることは，かなり困難であるという問題点あった．

以上のような背景から本研究では，リモートセンシングによる浅水域におけるSS・Chl.aの同時推定を目的とした．具体的には，SS・Chl.aの地点間濃度差が非常に大きく，ブイにより毎日，複数点の水質データが得られる環境にある手賀沼において，実測観測した分光反射率／実測水質データセットを使って推定方法を検討した．そして最終的には衛星データとブイデータを使って検証を行った．

2. 方法およびデータ

（1）リモートセンシングによるSS・Chl.a推定法

リモートセンシングによる水質推定において，非常に濁った河川河口のSS推定や外洋におけるChl.a推定は比較的簡単に導かれる．一般に，SSは濃度が高くなるにつれて，反射率が上がることが広く知られており（例えばNOVO，1989），最も基本的なSS推定モデルとして，以下のような1波長による推定が知られている．

$$SS \propto R_{\lambda} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，Rは反射率，λは波長である．使用される波長は，比較的波長依存性は小さいが，一般に可視・近赤外域では短波長よりも長波長の方がSSの推定精度が高いとされている．ただし近赤外域では水による顕著な光吸収があるため，比較的反射率が高い赤波長（600～690nm付近）

1 正会員　博（工）　広島大学助教大学院工学研究院
2 正会員　博（環）　山口大学助教大学院理工学研究科
3 正会員　博（工）　東京大学講師新領域創成科学研究科

を使う例が多い．

一方，Chl.a推定は，通常Chl.a吸収の大きい青バンドとChl.a吸収の小さい緑バンドのバンド比が使われることが多く，最も基本的なChl.a推定モデルとして以下のような2波長（λ_1とλ_2）比による推定が知られている（杉森・坂本，1985）

$$Chl.a \propto R_{\lambda 1}/R_{\lambda 2} \quad \cdots\cdots (2)$$

ところで，SSの濃度が高く，かつChl.aの濃度も高い水質環境における分光特性は実験室で詳しく調べられている（Han, 1997）．しかし実際の水域では，式（1）や式（2）で使われる波長も水域によって異なり，モデルもより複雑になることが多い．今回は，手賀沼においてはじめてのSS・Chl.a同時推定の試みであることから，第一段階として式（1）と式（2）の基本モデルを使用した統計的な最適波長選択のみを試行した．

（2）研究地域と現地データ

図-1は研究地域の手賀沼の位置と実測した分光反射率／水質測点およびブイ測点を示している．手賀沼は東西約7km，南北約1kmの大きさで，西側が上流，東側が下流であり，主要流入河川は，西方から大堀川，大津川，手賀川が存在する．なお，手賀沼には正式には本手賀沼と下手賀沼があるが，本論文の研究対象は本手賀沼とする．

現地の分光反射率／水質の観測は，小型船を使って2008年10月22日および2009年5月28日の午前11時±1時間程度に**図-1**に示した測点（AからFの順）で行われた（現地調査日程は本来ALOS観測日と同期すべきであるが，調査機器や人員の都合で数日異なる日となった）．分光測定機器は，小型分光放射計MS720（EKO製，観測波長域：350～1050nm，波長間隔：3.3nm，半値幅：10nm）と標準白色板（labsphere社，約13cm四方の寸法で可視・近赤外域の全波長域にわたり99%のほぼ均一な反射率を有する，以下標準板と呼ぶ）が用いられた．観測方法は，船上から分光計の開口部を鉛直下向きにして水面および甲板上に置いた標準白色板の分光放射輝度をそれぞれ測定した（**図-2**(a)参照）．測定条件は分光計の開口角90°，測定距離約15cmで，鉛直下向きに3回ずつ測定した．また最終的な反射率は3回の測定の平均値とした．なお，本研究の反射率は「水面直上の放射輝度」と「標準板の放射輝度」の比と定義した．ただし，解析には水面反射光や水面と標準板の測定時間差による影響をできるだけ低減するために，各地点のデータに対して，350～900nmの最大値と最小値で正規化した値を用いた．

SSおよびChl.aの定量は，船上から採水した表層水サンプルを持ち帰り，実験室で測定された．このうち，SSは近赤外の吸光度を利用するHach社製のHach DREL/2400を用いて測定した．また，Chl.aはアセトン抽出・吸光光度法で色素の吸光度を測定し，SCOR/UNESCOに基づき，Chl.aを算出する方法で測定した．

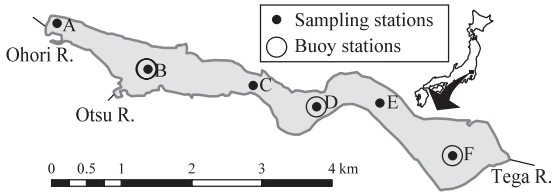
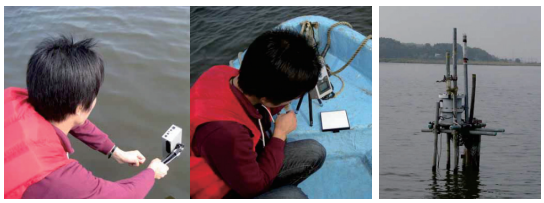


図-1　研究地域（手賀沼水質／分光測点）



(a) Reflectance measurement　(b) Buoy station

図2　調査風景およびブイの写真

さらに実測分光反射率から導かれたSSおよびChl.aの推定方法を使って行う衛星の検証には，**図-1**のB，D，Fに東京大学の鯉渕研究室が設置している，毎時間の自動濁度（今回はSS相当とした）・クロロフィル測定ブイ（JFEアドバンテック製COMPACT-CLW，**図-2**(b)参照）データを用いた．なお観測装置や得られる観測データの詳細は木村・鯉渕（2010）を参照されたい．

（3）衛星データおよび反射率変換法

実測で得られた分光反射率を衛星データで検証するために，今回用いた衛星データは，ALOS（Advanced Land Observing Satellite，通称「だいち」）に搭載されたAVNIR-2（Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2）データである．AVNIR-2センサの諸元を**表-1**に示す．

実際に研究に使用したAVNIR-2データの撮影日は，分光反射率測定実験が行われた日から数えて1週間以内の，2008年10月28日11時34分（ポインティング角：-34.3度）及び2009年5月20日（ポインティング角：0度）の2シーン（L1B2データ）である．

ALOSデータからの反射率計算は様々な方法が提案されているが，本研究では，比較的に簡単で衛星水質推定の研究に古くから使われている以下の式（3）（Lathrop, 1991）に従った．

$$R_\lambda = \pi(L_{s\lambda} - L_{p\lambda})/(ESUN_\lambda \cos\theta_z) \quad \cdots\cdots (3)$$

ここで，R_λは反射率（無次元値），$L_{s\lambda}$は衛星データから得られる放射輝度（W/m^2/sr/μm），$L_{p\lambda}$はパスラジアンス（主としてエアロゾル成分），$ESUN$は大気圏外分光放射

表-1　AVNIR-2センサの諸元

Band (center)	Band1：420-500nm (460nm) Band2：520-600nm (560nm) Band3：610-690nm (650nm) Band4：760-890nm (835nm)
Spatial resolution	10m
Swash	70km
Quantization	8bit

表-2　AVNIR-2の放射輝度変換係数

Band	*a*	*b*
1	0.588	0.000
2	0.573	0.000
3	0.502	0.000
4	0.835	0.000

表-3　AVNIR-2の反射率変換パラメータ

Band	*ESUN* (W/m²/μm)	$cos\theta_z$
1	1959	(Oct.) 0.607
2	1851	
3	1546	(May) 0.935
4	1061	

照度（W/m²/μm），θ_sは太陽天頂角（°）（90°－太陽高度角）である．このうち，AVNIR-2データのデジタル値（DN）からの$L_{s\lambda}$変換は，以下のような変換式と**表-2**の変換係数（ヘッダー値）に基づいて計算した．

$$L_\lambda = aDN + b \quad \cdots\cdots (4)$$

ここで，*a*，*b*は放射輝度変換係数をそれぞれ表す．また，$L_{p\lambda}$の推定は湖沼のリモートセンシング研究でよく用いられる暗画素法（水域の最も暗い場所における水中からの輝度を0と仮定して，各バンドの最小値をオフセット除去する方法）（MacFarlane and Robinson，1989）を用いた．また太陽天頂角はALOSデータのヘッダー値を，ESUNはIqbal（1983）の大気圏外分光放射照度表のAVNIR-2データの中心波長値をそれぞれ使った．以上のようにして決定された本研究で用いたAVNIR-2データのESUNの値を**表-3**に示す．さらに，ポインティング角（AVNIR-2センサの観測角度）による補正は式（3）にポインティング角の余弦（cos）を乗じることにより導かれる．

3. 研究結果

（1）現地水質調査結果の概要

図-3は調査日時における手賀沼のSSとChl.aの水平濃度分布を示している．これより，SS，Chl.aとも上流（**図-1**のA，B地点付近）は低く，中流～下流（**図-1**のC，D，E，F地点付近）で濃度が高くなる傾向がある．小川（1993）は1985年～1989年の手賀沼の年平均Chl.aを調べ，

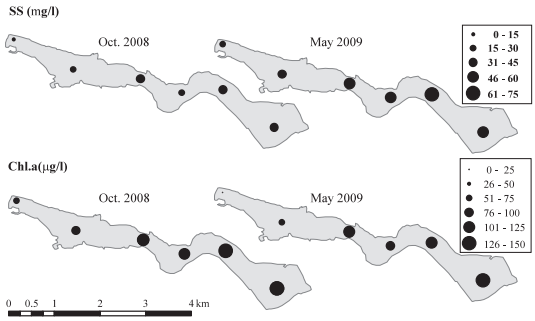


図-3　調査日のSSとChl.aの水平分布

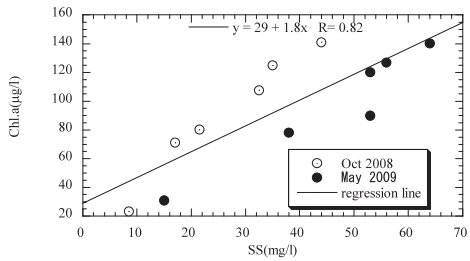


図-4　SSとChl.aの相関

経年的には下流側の方が上流側と比べて常に高い傾向を示しており，今回の結果はこれと一致し，調査日は特殊な水環境状態ではなかったと推察される．濃度差の絶対値としては，2008年10月でSSが36mg/l（9～44mg/l），Chl.aが11μg/l（23～141μg/l），2009年5月でSSが49mg/l（15～64mg/l），Chl.aが109μg/l（31～140μg/l）で両日とも同程度あった．さらに，**図-4**はSSとChl.aの関係を示す．各時期はSSとChl.aの相関は高いが，SSとChl.aの同時推定を検証する研究としては理想的には相関が低い日を使うべきである．しかし，今回はSSとChl.aの相関が低い日のデータが得られなかったため，これらのデータを使用して研究を行った．

（2）手賀沼の分光反射率特性

図-5は手賀沼において2時期，各6点で水面直上から観測した分光反射率測定結果である．これより，手賀沼の分光反射率は580nm付近（AVNIR-2バンド2付近）を極大として，それより短いまたは長い波長（AVNIR-2バンド1またはバンド3付近）では，大きく吸収されていることがわかる．特に670nm±50nm付近の極小と，700nm±50nm付近の極大は，クロロフィルの吸収と散乱・蛍光との関係で特徴的な波形を示している．このような分光的な特徴は，チェサピーク湾（Gitelsonら，2007），ディストリクト湖（Thiemann. and Kaufmann，2002），霞ヶ浦（沖・安岡，1996），宍道湖・中海（作野・松永，2008）等，各地の富栄養化水域の分光特性と同様であった．さらに，800nm±20nm付近（AVNIR-2バンド4付近）は外洋では通常反射率が0として扱われ

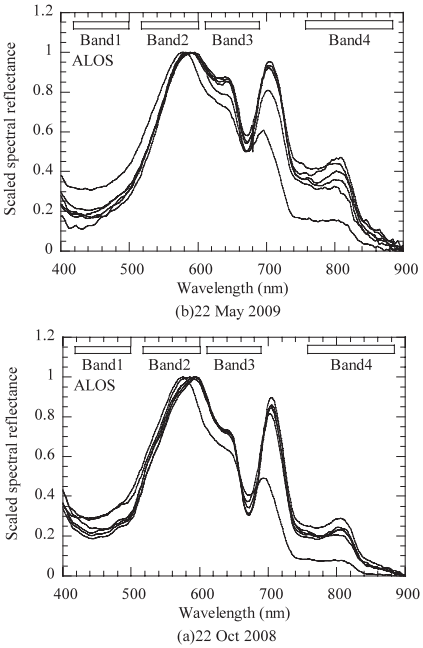


図-5　手賀沼の実測分光反射率特性（6地点分）

ることが多いが，手賀沼では反射率が0ではなく，かつ極大も見られた．ALOSの観測波長と比較すると，バンド2とバンド3で極小，バンド2とバンド4で極大のピークをとらえていることがわかる．ただし，700nm付近の極大波長はとらえられていない．

（3）分光反射率比とSS・Chl.aの関係

図-6は，分光反射率データに基づきALOS/AVNIR-2の単バンドおよびバンド比をシミュレートした値とSSおよびChl.aの関係（r^2：決定係数）を示した図である．これより，SSはALOS Band4相当の反射率で非常に高いr^2（0.93）を示した．これはHan（2007）が行った室内実験の結果と一致している．一方，Chl.aは単バンドよりもバンド比で高いr^2（0.66）を示した．最も相関の高かったバンドの組み合わせを図-7に示す．ただし，Chl.aは常用対数をとった場合より相関が高かったため（r^2=0.74），横軸を対数で表している．ただし，このバンド比ではSSとの相関も高いため，今後SSとChl.aの相関が低い日時のデータで再検証する必要があると考えられた．

（4）衛星データによる検証

図-8は，分光反射率とSS・Chl.aの相関解析から得られた結果に基づき，衛星データによる検証結果を示している．ただし，図-7と図-8では反射率，反射率比のオーダーがかなり異なっている．これは，衛星データからの反射率変換の際に使用した暗画素法では，パスラジアンス（大気ノイズ情報）を過剰に引いてしまうため（相関解析には問題ないが，実測よりも小さい値となる）だと

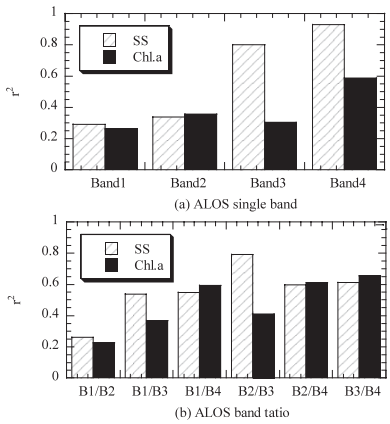


図-6　疑似ALOSデータSSおよびChl.aの決定係数

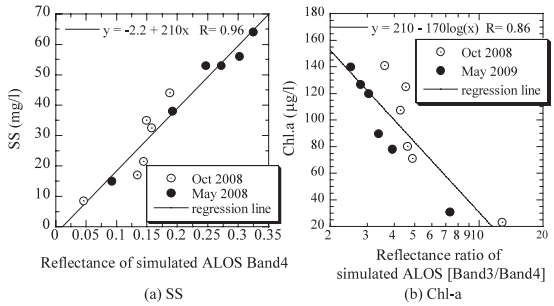


図-7　分光反射率データに基づくALOSによるSSおよびChl.a推定シミュレーション結果

考えられる．また図-7と図-8では，Chl.aのオーダーもかなり異なっている．これは，船で実測したChl.aは採水後吸光度法で測定しているのに対して，ブイのChl.aは現場蛍光法で測定していることに起因していると考える．実際，今回船で実測したChl.aとブイのChl.aデータを比較すると平均で70μg/l程度ブイのデータの方が低い値となった．このような事項をふまえ，図-8をみると，濁度は，ALOS Band4と，Chl.aはALOS Band3とBand4の比でそれぞれ高い相関（それぞれR=0.87とR=0.97）が得られた．最終的に2時期の関係式（図-8）を用いてALOSから導かれた濁度とChl.a分布図を図-9と図-10に示す．これらの推定分布図は，実測したSS，Chl.aの分布とよく一致していた（図-3参照）．このように衛星データを用いて，手賀沼SS・Chl.a分布の詳細（濃度の境界部等）を分かりやすく視覚化できた．

4. まとめ

本研究は，リモートセンシングによる浅水域におけるSS・Chl.aの同時推定を試み，以下のような結果が得られた．ALOS/AVNIR-2のBand4によりSSが，Band3とBand4の比によりChl.aが，それぞれ比較的高い相関を示し，同時推定可能であることが実測分光／水質データセ

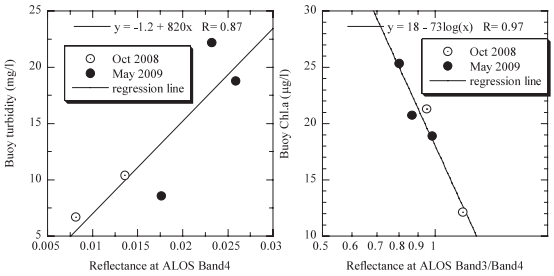


図-8　ALOSデータとブイ濁度・Chl.a検証

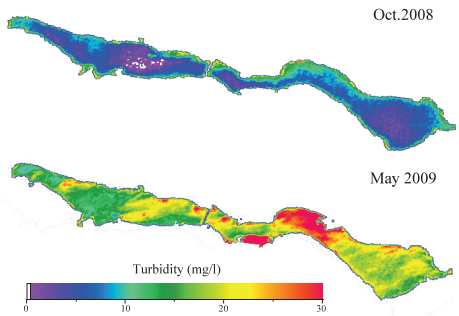


図-9　ALOSデータから推定した濁度分布

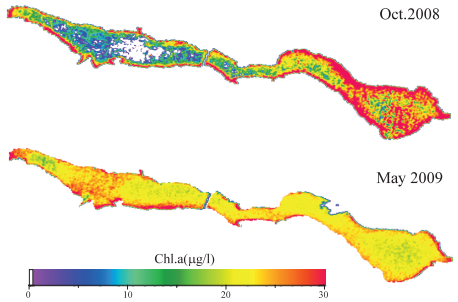


図-10　ALOSデータから推定したChl.a分布

ットおよび衛星データ／ブイデータセットからそれぞれ検証された．今後はSSとChl.aの相関が低い場合を検証する等，多時期の衛星データを使った安定的なSS・Chl.aの推定アルゴリズムを確立したい．

謝辞：本研究の一部は，「平成20年度　（財）クリタ水・環境科学振興財団助成」，「平成21年度財団法人山陽放送学術文化財団研究助成」，「平成21年度（財）中国電力技術研究財団 試験研究（B）助成」（いずれも研究代表：作野裕司）の研究の一環として行われた．記して関係機関に深く感謝の意を表す．

参　考　文　献

神野有生・鯉渕幸生・磯部雅彦（2009a）：浅水域における各種消散係数の光学条件依存性，土木学会論文集B2（海岸工学），B2-65，1，pp.1456-1460.

神野有生・鯉渕幸生・作野裕司・磯部雅彦　（2009b）：衛星画像を用いた水深分布予測における空間的自己相関性の利用可能性，水工学論文集，第53巻，pp.1021-1026.

木村真理・鯉渕幸生（2010）：手賀沼のクロロフィルa・溶存酸素濃度の通年観測，水工学論文集，第54巻，pp.1489-1494.

作野裕司・松永恒雄・中山大介・六川修一・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄（1999）：SPOT/HRVデータによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィルa濃度分布の推定，日本リモートセンシング学会誌，第19巻，2号，pp.20-36.

作野裕司・吉田武史・松永恒雄・中山大介・高安克巳（2003）：多時期Landsat/TMデータを用いた宍道湖・中海のクロロフィルa濃度分布推定，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1011-1015.

作野裕司，松永恒雄（2008）：分光反射率データを用いた汽水湖における高クロロフィルa濃度の推定精度評価，環境工学研究論文集，Vol.45，pp.113-119.

杉森康宏・坂本　亘（1985）：海洋環境光学，東海大学出版会，356p.

沖　一雄・安岡善文（1996）：高濃度水域における近赤外波長帯を含む二波長によるクロロフィルa推定モデルの作成，日本リモートセンシング学会誌，第16巻，4号，pp. 1-9.

山田安彦・白鳥孝治・立本英機編（1993）：印旛沼・手賀沼水環境への提言，古今書院，167p..

Gitelson, A. A., Schalles, J. F., Hladik, C.m. (2007) : Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productivite estuaries: Chesapeak Bay case study, Rem. Sens. Environ., Vol.109, pp.464-472.

Han, L. (1997) : Spectral reflectance with varying suspended sedimanet concentrations in clear and algae-laden waters, PE & RS, Vol.63, No.6, pp.701-705.

Iqbal, M. (1983) : An introduction to solor radiation, Academic Press, 390p.

Lathrop, R.G., Lillesand, T.M., and Yandell, B.S. (1991) : Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters, International Journal of Remote Sensing, Vol.12, pp.2045-2063.

MacFarlane, N. and Robinson, I. S. (1984) : Atmospheric correction of LANDSAT MSS data for amultidate suspended sediment algorithm. International Journal of Remote Sensing, Vol.5, pp.561-576.

Novo, E. M. M., Hansom, J. D., and Curran, P. J. (1989) : The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. International Journal of Remote Sensing, Vol.10, pp.1283-1289.

Thiemann, S. and Kaufmann, H. (2002) : Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data - a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany, Rem. Sens. Environ., Vol.81, pp.228-237.