

実測分光反射率データを用いたSGLIによる 中海の透明度推定の可能性評価

Feasibility Study of Transparency Estimation in Lake Nakaumi by SGLI using in-situ Spectral Reflectance Data

作野裕司¹・宮本 康²・古津年章³・下舞豊志⁴・松永恒雄⁵・中山大介⁶

Yuji SAKUNO, Yasushi MIYAMOTO, Toshiaki KOZU, Toyoshi SHIMOMAI
Tsuneo MATSUNAGA and Daisuke NAKAYAMA

A feasibility study for the evaluation of the Secchi Disk Depth (SDD) by SGLI in Lake Nakaumi which is located in Shimane Prefecture, Japan, was conducted by using the in-situ spectral reflectance data collected in August 2005. As a result, the following conclusions were obtained. (1) The characteristics of spectral reflectance in the lake and their relationship to the band positions of the SGLI sensor were qualitatively understood. (2) Relatively high correlations were obtained between “VN4, VN5, VN6, and VN7” bands of SGLI and SDD. (3) The SDD in the lake can be estimated from the multiple regression method using SGLI four bands (VN4, VN5, VN6, and VN7) with the RMS error of about 0.2 m.

1. はじめに

島根県と鳥取県の県境付近に位置する中海は、同湖北部の本庄水域（旧本庄工区）の干拓中止による森山堤開削工事に伴い、2009年5月初旬に約30年ぶりの本格的潮通しが実施された。その影響で今後同水域において劇的な水質環境変化が予想される。特に、中海の透明度（光環境）調査は、単に水質の指標としてだけでなく、近年藻場の生育分布との関連で非常に重要であることが指摘されている（宮本・初田, 2007）。また、透明度は測定方法が簡単で、比較的古くから測定されていたため、中海でも長期の水質変化の指標として使われている（Hiratsukaら, 2007）。さらに現在、中海は宍道湖と共に、JALTER（日本長期生態学研究ネットワーク）のコアサイトに指定されており、今後継続的に水質や藻場のモニタリングを行う必要があり、安価で均質なモニタリング手法が求められている。しかし、中海は東西、南北に10km以上の広さを有し、地形も複雑なため、広域的・同時的な水質分布を推定するためには、従来型の調査船による現地調査のみでは多大な労力と費用を要するという問題点がある。

そこで筆者らは、これまで比較的安価で広域的なモニタリングに有効な衛星リモートセンシングによる中海の環境解析研究を行ってきた（例えば、作野ら, 1999；市

川ら, 2008）。中海本庄水域周辺に関する最近のリモートセンシング研究では、衛星や気球搭載カメラから撮影された画像を使って、水質や藻場のモニタリング手法についての成果がある（作野ら, 2003；作野, 2008；作野ら, 2009）。ただし、これらの成果はある一時期または年に数回の頻度で取得されたデータであり、常時得られるデータではない。従って、時空間的な水質変化の激しい中海の定常的なモニタリングにはほぼ毎日中海を観測する海上センサが必要である。

現在稼働している海上センサ「MODIS」は最大250m解像度を持つが、海上を解析するためのバンドは1km解像度のモードしかなかった。一方、250mの解像度を持ち、沿岸水質の常時モニタリングを目指す国産の海上センサSGLI（今岡, 2007）は、2013年打ち上げに向け、現在打ち上げ準備がなされている。今春からは本格的な水質推定等のアルゴリズム開発研究公募を行っている。しかし、水質リモートセンシング分野では高濃度の水質検出手法開発が遅れており、SGLIによる水質推定法も定まっていない。

そこで筆者らは、将来の中海におけるSGLIセンサの利用を目標として、あらかじめSGLIによる透明度推定可能性を評価することを本研究の目的とした。具体的には中海で船上観測した分光反射率／透明度データセットを使って、SGLIによる中海の透明度推定法について検討した。

2. 方法

(1) リモートセンシングによる透明度推定法

リモートセンシングによる透明度推定は、海洋においては通常490nmの消散係数 (K_d (490), m^{-1}) を推定することによって導かれる（Chenら, 2007）。例えば衛星に

1 正会員	博(工)	広島大学助教	大学院工学研究科
2	博(水)	鳥取県衛生環境研究所特別研究員	
3	博(工)	鳥根大学教授	総合理工学部
4	博(工)	鳥根大学助教	総合理工学部
5	博(工)	国立環境研究所室長	
6	修(理)	鳥根大学汽水域研究センター客員研究員	

よる $K_d(490)$ の推定には、青と緑の可視光の放射輝度比から、以下のような関係式等が使われる(杉森・坂本, 1985)。

$$K_d(490) = a[L_u(443)/L_u(550)]^b + 0.022 \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 L_u は水面からの上向き分光放射輝度、 a 、 b は定数、加法係数 0.022 は水の消散係数に相当する。最終的には、以下のような関係式で透明度 (SDD) の推定式が導かれていることが多い。

$$SDD = a' K_d(490)^{b'} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 a' 、 b' は定数である。ただし式 (1)、式 (2) はいずれも海洋における透明度推定の場合である。従って透明度が植物プランクトン濃度のみに依存しているような状態である場合に限って有効である。中海のような、無機物と有機物が高濃度で混合している懸濁物質を含む水では、多くが統計的手法により推定式を作成して、リモートセンシングによる透明度推定が試みられる。

一方、SGLI の元となった ADEOS-II/GLI センサの Chl.a 推定手法として、複数バンドを使った LCI (Linear Combination Index) と呼ばれる線形結合アルゴリズム (Frouin ら, 2006; 松尾ら, 2007) があり、SGLI でもこのアルゴリズムが有力な水質推定法となることが予想される。LCI アルゴリズムの最終的な式は、以下のような形で表わされる。このようにして得られた LCI は、海洋の Chl.a と高い相関がある。

$$LCI = R_{rs}(460) + cR_{rs}(560) + dR_{rs}(650) + eR_{rs}(825) \quad \cdots (3)$$

ここで、 R_{rs} はレーリー散乱大気補正済み反射率、括弧内の数値は波長 (nm) を表す。 c 、 d 、 e はエアロゾル散乱成分を 0 にするための係数で、使用波長によって、理論的に決められる。ただし、460nm、560nm、650nm は主に水質を推定するためによく使われるバンドで、場合により 650nm は使用されないこともある (JAXA の 500m 解像度 MODIS の Chl.a プログラムで採用)。825nm は主にエアロゾルを推定するためによく使われるバンドとなる。筆者らが、実際過去の GLI データを使って中海の赤潮時の Chl.a 推定に LCI アルゴリズムを適用したところ、実測 Chl.a との相関が非常に高かった (作野ら, 印刷中)。一般に透明度と Chl.a は高い相関があり、LCI アルゴリズムは透明度推定でも利用可能だと思われる。しかし、LCI アルゴリズムは分光反射率データのみでは再現できない。そこで、本研究では LCI アルゴリズムを参考にして、中海の透明度と分光反射率の関係を線形結合関係にあると仮定して、以下のような重回帰式を提案する。

$$SDD = m + \sum_{i=1}^n n_i R_i \quad \cdots \cdots (4)$$

表-1 GCOM-C1 SGLI の中心波長 (λ)、波長幅 ($\Delta\lambda$) および空間分解能

バンド	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	空間分解能 (m)
VN1	380	10	250
VN2	412	10	250
VN3	443	10	250
VN4	490	10	250
VN5	530	20	250
VN6	565	20	250
VN7	670	10	250
VN8	670	20	250
VN9	763	8	1000
VN10	865	20	250
VN11	865	20	250

ここで、 R は上向き分光反射率または反射率比で、 m 、 n は定数、 i はバンドである。本研究では、水面直上から採取した分光反射率データを使って、SGLI バンドに相当する反射率を計算し、式 (4) を作成する。ただし、実測の分光反射率データには大気の影響は含まれないので、本研究では、式 (4) で使用するバンドは可視域のみとする。

(2) GCOM-C1 SGLI 衛星の性能について

本研究で対象となる GCOM-C に搭載される SGLI (Second-generation Global Imager) は、2013 年に打ち上げが予定される 250m の空間分解能を要する海色センサである。SGLI の主要な性能 (中心波長、波長幅、空間分解能) を表-1 に示す。

(3) 現地データ

図-1 は研究地域の中海の位置と実測した分光反射率と水質の測点を示している。このうち、解析に使用した分光反射率/透明度データセットは、小型分光放射計 MS720 (EKO 社) とセッキ板を使って、2005 年 8 月 30 日に中海の沿岸部 12 点で取得したものである。図-2 は実測値をスプライン補間して推定した分光反射率測定日の透明度分布である。この日の透明度分布は図のように湖南東部が低く、湖中央部では東部ほど透明度が高い複雑な分布をしていたことがわかる。また、分光反射率測定の方法としては調査用の小型船上から分光計の開口部 (開口角 90°) を鉛直下向きにして水面からの分光放射輝度を測定した。また、入射光量の測定には labsphere 社の標準白色板 (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) を用いた。今回の反射率は両者 (水面と白色板で反射された太陽光) の分光放射輝度比と定義した。

一方、中海の透明度とその他の水質 (Chl.a, SS, 水温, 塩分等) の関係を調べるためのデータとして、2001～2002 年までの 9 日間 (5 月～12 月)、筆者らが船舶による衛星同期水質調査で取得したデータセットを使用した。このうち、水質調査日と Chl.a、透明度、SS の測定レンジを表-2 に示す。

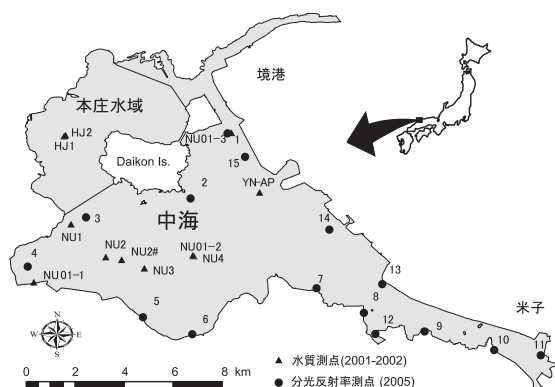


図-1 研究地域 (中海水質／分光測点)

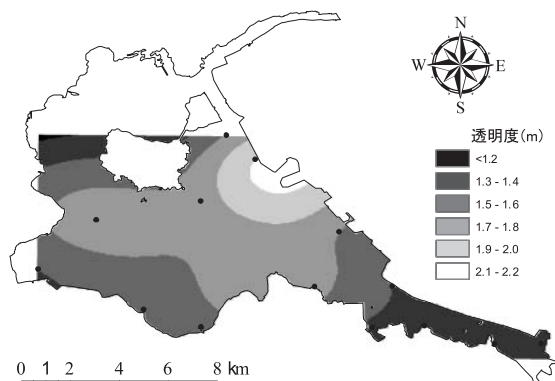


図-2 分光反射率測定日 (2005/8/30) の推定透明度分布

表-2 水質測定レンジ

調査日	測点数	透明度 (m)	Chl.a (μg/l)	SS (mg/l)
2001/ 7/25	3	1.8-2.3	40-4.7	—
2001/ 8/11	3	1.7-1.9	8.7-10.4	—
2001/10/30	4	1.2-1.4	4.1-11.7	1.8-3.0
2001/11/10	8	1.3-2.5	—	3.0-6.8
2001/12/ 1	4	1.0-1.2	12.9-23.9	2.1-5.0
2002/ 5/ 2	3	1.0-1.6	7.3-13.8	—
2002/ 8/22	3	1.7-2.1	7.1-10.6	—
2002/ 9/12	4	—	6.8-11.0	5.2-7.6
2002/ 9/14	3	2.0-2.7	6.6-11.8	19.6-29.0

3. 結果及び考察

(1) 反射率測定日における中海の分光反射率特性

図-3は中海の12点で水面直上から観測した分光反射率測定結果 (最大値と最小値で正規化した) である。これより、570nm付近 (SGLIではVN6) を極大として、それより短い波長 (420nm付近が極小) または長い波長 (730nm付近が極小) では、大きく吸収されていることがわかる。特に670nmの強い吸収は宍道湖の分光特性 (松永ら, 1996; 作野・松永, 2008) とも一致しており、特徴的である。同様の分光反射率特性は富栄養化湖沼の霞ヶ浦でも観測されている (岡見ら, 1982; 沖・安岡,

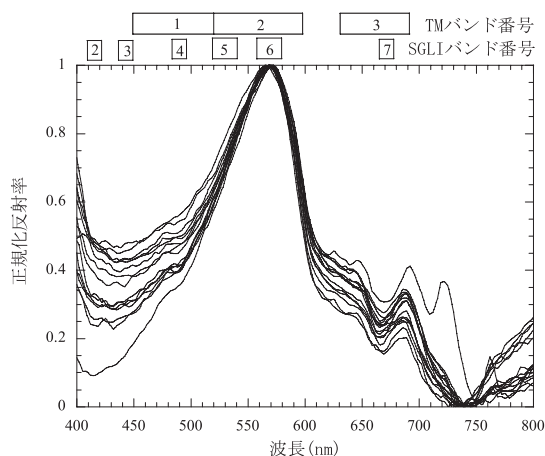


図-3 中海の実測分光反射率特性 (12地点分)

1996)。また図-3の上の欄に本研究で対象とするSGLIと代表的な陸域観測衛星Landsat/TMのバンドの位置を示す。これよりSGLIはTMのような3~4バンドのブロードバンドセンサと比べ、中海の特徴的な分光反射率特性波長 (420nm, 570nm, 670nm) を再現できる可能性が高いことが示唆された。

(2) 分光反射率と透明度の関係

式 (4) による透明度推定を行う前段階として、まずSGLI各バンドの反射率又は反射率比との関係を調べた。反射率比は対象の持つ分光的な特徴を強調できるため、しばしば水質の解析に用いられる。透明度の推定に有効な波長としては、式 (1) に示した443nm (VN3付近)、550nm (VN6付近) の他、520nm (VN5付近)、694nm (VN7付近) が知られているが (岡見ら, 1982)、中海では最適バンドが不明であるため、ここでは図-3を参考に、単バンドとしては、VN2~VN7の各バンド、比バンドとしては、VN6とVN7の反射率をそれぞれ分母にし、それらより小さい波長の反射率を分子にした場合の反射率比の組み合わせを試した。図-4および図-5は、実測分光反射率データを使って模擬したSGLIセンサの反射率又は反射率比と透明度 (SDD) の関係を示している。これより、いずれのバンドとも透明度と低相関 ($R=0.4$ 以下) であり、単純にSGLIデータから透明度を推定するのは難しいことがわかる。ただし、相対的には、単バンドではVN6, VN7を使った場合に相関が高く、「VN7」と「VN4, VN5, VN6」の反射率比が他の組み合わせよりも相関が高くなっている。従って、SGLIによる中海の透明度推定にはこれらのバンドの組み合わせが有効だと考えられた。

(3) 透明度と他の水質との関係

図-6に中海の透明度と各種水質との関係を示す。これによると、中海の透明度は統計上ではChl.a, SSと弱い

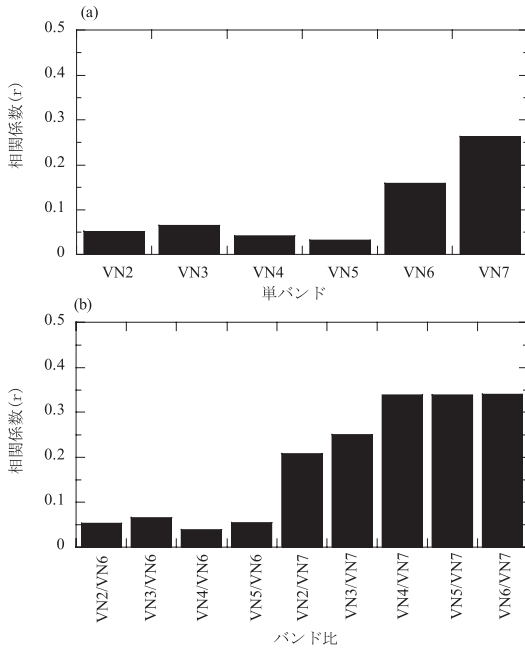


図-4 SGLIのバンドと透明度の相関係数

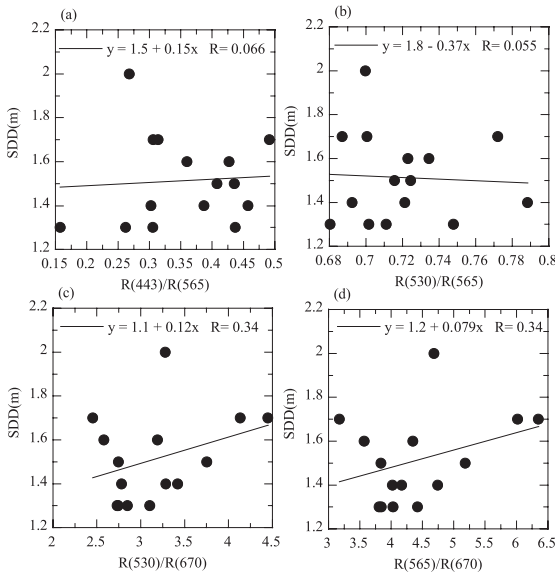


図-5 SGLIバンド比と透明度の関係

相関（それぞれ $R=-0.53$ と $R=0.73$ ）があり、水温や塩分とは無相関であることがわかる。Hiratsukaら（2007）は、中海湖心のみであるが透明度とChl.aには負の相関関係（ $r=-0.50$ ）を見出しており、これに矛盾しない。ただし、今回SSと透明度が正の相関を示すのは一般的ではない。SSと透明度の関係は特にSSが約20mg/l以上の時に透明度が高くなっている点が一般的ではなく、これらのデータは、記載ミスなどの人為的エラー、またはSS分析用の

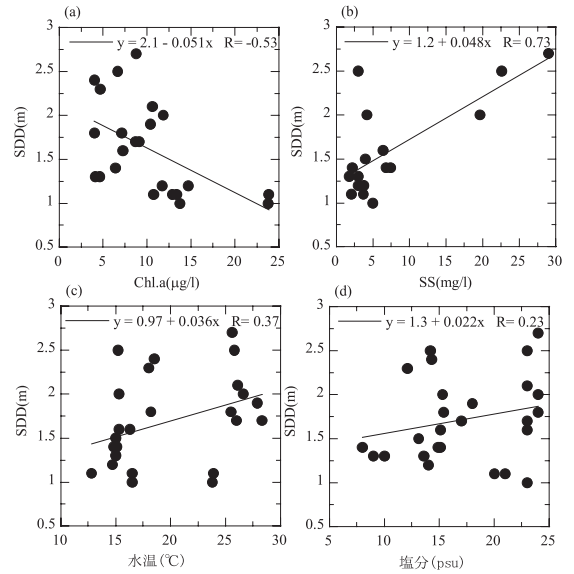


図-6 透明度と各種水質の相互相関

採水時に透明度測定時になかった比較的大きい粒子の懸濁物質を捕集した可能性等が考えられたが、今回は原因の特定をするためのデータが不足しているため、両者の関係は不明であった。以上のことから、少なくともリモートセンシングで中海のChl.aを推定できるのならば、透明度推定も可能である。従って、Chl.a推定法を参考にして提案した式（4）は、中海の透明度推定でも利用できる可能性が高いと考えられた。

(4) 多バンド反射率による透明度推定

これまでの解析結果から、中海の透明度推定に有力なSGLIバンドとして、VN4、VN5、VN6、VN7が候補として挙げられた。そこで式（4）を使った中海の透明度推定として、ここに挙げたSGLIの4バンドの反射率と透明度データセットを使って、重回帰分析を行い、係数を決定した。その結果、実測透明度とSGLI推定透明度の関係は、図-7に示すようになり、以下のような関係式が導かれた。

$$SDD = 3.0/VN4 - 4.1/VN5 - 5.2/VN6 + -2.6/VN7 + 8.8 \cdots (5)$$

式（5）の重回帰係数は0.40、RMS誤差は0.19mであった。従って、適切な大気補正が行われれば、SGLIを使って中海の透明度分布を約0.2mの精度で推定できる可能性が示された。

4. まとめ

実測分光反射率データを用いて、SGLIによる中海の透明度推定の可能性評価を行った。その結果、以下のような成果が得られた。

- (1) 中海の分光反射率を測定し、中海の基本的な分光特性およびSGLIセンサの観測波長との関係を定性的に把握した。
- (2) SGLIの観測波長の反射率と透明度の相関を調べた結果、SGLIの単バンド、比バンドと透明度の相関は低いが、SGLIのVN4, VN5, VN6, VN7を使用した組み合わせの時に相対的に相関が高くなった。
- (3) SGLIの4バンド(VN4, VN5, VN6, VN7)反射率と透明度との重回帰分析を行い、RMS誤差約0.2mで中海の透明度分布を推定できる可能性を示した。

今後は、現地において引き続き分光反射率／透明度データセットを収集し、本研究で得られた透明度推定法の検証または修正を行いたい。また、透明度が高いとき、湖底反射の影響が出る可能性がある。そのような影響をどのようにして判断し、取り除くかについての議論も必要である。そして、最終的にはSGLIの打ち上げ後に、実際のSGLIデータを使って、本法の検証を行うつもりである。

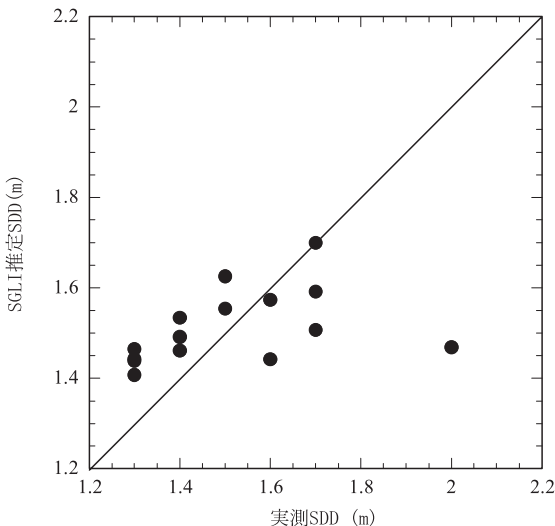


図-7 実測透明度とSGLI推定透明度の関係

参 考 文 献

- 今岡啓治 (2007) : 地球環境変動観測ミッション (GCOM) の概要, 日本リモートセンシング学会第43回学術講演会論文集, pp. 67-68.
- 市川啓祐・古津年章・下舞豊志・作野裕司・松永恒雄・高安克己 (2008) : 衛星搭載合成開口レーダによる汽水域の湖上風速分布推定, 日本リモートセンシング学会誌, 28 (5), pp. 411-426.
- 松永恒雄・作野裕司・高安克己・中村幹雄・國井秀伸 (1996) : 宍道湖における水面の分光特性と水質, 日本リモートセンシング学会第20回学術講演会論文集, pp. 67-68.
- 松尾 貴・河野幸恵・福島 甫 (2007) : LCI法による海色大気補正-吸収性エアロゾルに対する有効性-, 日本リモートセンシング学会第43回学術講演会論文集, pp. 203-204.
- 宮本 康・初田亜希子 (2007) : 今日の中海における沿岸藻場の水平的・垂直的な分布構造, LAGUNA (汽水域研究), No.14, pp. 9-16.
- 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1982) : 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.2, No.1, pp. 21-31.
- 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, Vol.16, No.4, pp. 1-9.
- 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, 19 (2), pp. 20-36.
- 作野裕司・吉田武史・松永恒雄・中山大介・高安克己 (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, 50, pp. 1011-1015.
- 作野裕司 (2008) : 衛星「だいち」データによる中海本庄水域の濁度分布特性評価, 海洋開発論文集, 24, pp. 1063-1068.
- 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, 45, pp. 113-119.
- 作野裕司・ルイ ソチュー・國井秀伸・田中義和・國貞栄二・若松芳樹 (2009) : 気球搭載ビデオカメラによる中海のアマモ場の植被推定, 水工学論文集, 53, pp. 1357-1362.
- 作野裕司・古津年章・下舞豊志・松永恒雄・國井秀伸 (2009) : ADEOS-II GLIによる赤潮発生時の中海のクロロフィルa分布推定, 海洋開発論文集, 25, pp. 509-514.
- 杉森康宏・坂本 亘 (1985) : 海洋環境光学, 東海大学出版会, 356p.
- Chen, Z., Muller-Karger, F. E., Hu, C. (2007) : Remote sensing of water clarity in Tampa Bay, Remote Sensing of Environment, 109, pp. 249-259.
- Frouin, R., Deschamps, P., Gross-Colzy, L., Murakami, H., and Nakajima, T. (2006) : Retrieval of chlorophyll-a concentration via linear combination of ADEOS-II Global Imager data, Journal of Oceanography, Vol.62, pp. 331-337.
- Hiratsuka, J., Yamamuro, M., Ishitobi, Y. (2007) : Long-term change in water transparency before and after the loss of eelgrass beds in an estuarine lagoon, Lake Nakaumi, Japan, LIMNOLOGY, Vol.8, pp. 53-58.