

多波長リモートセンシングによる汽水域懸濁物質起源推定 —中海・宍道湖を例として—

大森康裕¹・古津年章²・下舞豊志²・三瓶良和²・瀬戸浩二³

Estimation of the origin of suspended solids in brackish lake using multi-wavelength remote sensing data: a case study of Lakes Nakaumi and Shinji

Yasuhiro Oomori¹・Toshiaki Kozu²・Toyoshi Shimomai²
Yoshikazu Sampei²・Koji Seto³

Abstract: The origin of Suspended Solid (SS) in the brackish-water lake is mainly divided into the plankton in water, fine clastics with terrestrial organic fragment in river water, and reworked sediments from lake bottom. Total organic carbon (TOC) content and mass ratio of Carbon to Nitrogen (C/N) in the suspended substance are known to be different depending on the origin. It is expected that the origin of the SS can be estimated by the TOC content and C/N ratio measurements. An attempt was made to estimate the TOC content and the C/N ratio of the brackish lake by using a series of data measured by a spectroradiometer, and the feasibility to estimate the origin of SS was studied. Four types wavelength selection was studied for multiple regression analysis to estimate TOC content and C/N ratio, including the simulation of SGLI sensor planned to be onboard the GCOM-C satellite. As a result, it was found that the origin of the SS in the brackish-water lakes, Nakaumi and Shinji can be estimated to some extent by multi-wavelength visible remote sensing.

Key words: Suspended solids, Total Organic Carbon, C/N ratio, SGLI.

はじめに

島根県東部及び鳥取県西部に位置する宍道湖と中

海は、淡水と海水が混ざりあう汽水域である。汽水域は、淡水域の生物と海水域の生物が共存し、周辺流域からの栄養塩が多く行き渡ることから、富栄養

¹ 島根大学総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University. Matsue, 690-8504

² 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University. Matsue, 690-8504

³ 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University

受付日：2010年7月15日，受理日：2010年10月14日

化の起きやすい環境である。そのため汽水域での水環境の観測として、船舶や定点での観測が行われてきた。しかし、広大で変化の激しい汽水域では、その観測にも限界がある。そこで人工衛星などを用いて、対象に直接触れずに広域データを同時に採取することが可能な、リモートセンシング技術を用いた水質観測を併せて行っていくことが有効であると考えられる。

これまで行われてきたリモートセンシング技術を用いた汽水域の観測研究では、観測対象として光の反射に直接関係するパラメータである濁度やクロロフィル a 濃度推定の試みが行われてきた (作野ほか, 2004; 山本ほか, 2007; 作野・松永, 2008)。

汽水域の水環境の理解を深めるためには、濁りの原因となる物質である懸濁物質の起源を推定することが重要である。汽水域では、河川が起源の懸濁物質、汽水域が起源の懸濁物質が存在する。そして汽水域は海からの影響を受けるため、例えば富栄養化においても、ほかの水域に比べてそのプロセスは複雑である。起源推定を行うことにより、汽水域における生物資源分布の研究や、汽水域周辺の水流についての議論に有用であると考えられる。しかし、リモートセンシング技術を用いた濁度やクロロフィル a の推定では、懸濁物質の起源を直接推定することはできず、汽水域における懸濁物質起源の推定手法は開発されていなかった。

本研究では起源推定の有用性の観点から、宍道湖・中海流域を実験サイトとした。そして多バンドによる人工衛星での観測を念頭に置き、分光放射計を用いて測定された水の分光反射率と、採取した懸濁物質から、懸濁物質起源とその割合の推定を試みた。

懸濁物質及び現場観測

懸濁物質

懸濁物質とは、水中に浮遊している微粒子のことを言い、濁りの原因となる物質である。ここで、乾燥した懸濁物質中の炭酸塩炭素を除く炭素濃度を全有機炭素 (以下 TOC) 濃度、全有機炭素と全窒素の重量比を C/N 比とする。TOC 濃度と C/N 比の値は、汽水域の懸濁物質の主な起源である、「湖水中のプランクトン」、「河川からの流入」、「湖底表層泥 (ここでは、湖底からの巻き上げと同質とみなす)」によってその値が異なることが知られている (例えば, Bordowskiy, 1965a, 1965b; Müller, 1977; Prahel *et al.*

表 1 汽水域における主な起源の TOC 濃度と C/N 比 (Bordowskiy, 1965a, 1965b; Müller, 1977; Prahel *et al.*, 1980; Ertel and Hedges, 1984; Hedges *et al.*, 1986; Meyers, 1997; Sampei and Matsumoto, 2001)。

Table 1 TOC content and C/N in SS from major origins in brackish lakes (Bordowskiy, 1965a, 1965b; Müller, 1977; Prahel *et al.*, 1980; Ertel and Hedges, 1984; Hedges *et al.*, 1986; Meyers, 1997; Sampei and Matsumoto, 2001) .

Origin of SS	C/N ratio (Mass ratio)	TOC content [%]
Plankton	5~6	20~40
River water	15~90	5~6
Bottom sediment	6~8	0.5~3

et al., 1980; Ertel and Hedges, 1984; Hedges *et al.*, 1986; Meyers, 1997; Sampei and Matsumoto, 2001)。この違いから、起源によって水の色もやや異なると考えられる。表 1 に文献値をまとめた各起源における TOC 濃度、C/N 比を示す。懸濁物質がプランクトン主体の場合は、TOC 濃度と C/N 比は植物プランクトンの構成比に従う。河川からの流入が主体の場合、TOC 濃度は他の起源と比べて小さい。これは河川からの流入では、落ち葉などの有機成分が少なく、粘土鉱物などの無機成分が多いためである。C/N 比は他の起源と比べて高い値を示している。これは地上の植物が、窒素を少量しか含まないセルロースなどで構成されているからである。それに対しプランクトンは、その成分の約 40% を、窒素を多量に含むタンパク質で占めている (小山, 1980)。Sapropel を除く一般的な汽水域湖底からの巻き上げの場合 TOC 濃度が最も低い。底質が貧酸素に成りやすい中海でも 3-4% 程度である (Sampei and Matsumoto, 2001)。これは河川からの粘土鉱物などによって有機物が希釈されたためである。また、富栄養化した汽水湖湖底にはプランクトンの死骸があまり分解せずに沈殿するため、C/N 比はプランクトン主体の場合に近い値をとる。

現場観測データ

本研究では、現場観測によって得られた水の分光反射率と、採取した懸濁物質を使用した。観測は 2007 年から 2008 年にかけて、宍道湖と中海の間に位置する大橋川で 15 回行った。懸濁物質は濾過、乾燥した後、CNS 元素分析装置を用いて水 1 l 中の全有機炭素と全窒素の量を求めた。この結果から、

TOC 濃度（塩酸処理によって炭酸塩炭素を除いた値）及び C/N 比を求めた。

観測使用機器及び衛星搭載センサ SGLI

本研究で使用した観測機器は、分光放射計（オプトリサーチ社 HSR-8100）である。使用した分光放射計は、300~1100nm の範囲の分光放射輝度に比例するカウント値（以下カウント値）を波長分解 10nm 以下で測定可能で、これを以下の式から反射率に変換する。

$$R = \frac{y - d}{x - d} \times 0.02 \times 100 \quad (1)$$

R は反射率 [%], y は水面のカウント値, x は 2 % 反射板のカウント値, d は暗闇におけるカウント値である。

GCOM-C は、JAXA が進める地球環境変動観測ミッションとよばれる計画で打ち上げられる予定の、人工衛星である。GCOM-C には SGLI と呼ばれるセンサが搭載され、可視～熱赤外までの 17 波長を使った観測が可能で、250m という分解能、使用波長の多さから環境モニタリングに適していると考えられる（宇宙航空研究開発機構、2010）。本研究では、TOC 濃度、C/N 比を推定する際にシミュレーションとして、このセンサが使用するバンドの一部を使用した。

TOC 濃度及び C/N 比推定

先ほど述べたように、本研究の目的は水の分光反射率から懸濁物質の起源を推定することである。表 1 より、懸濁物質の起源によって TOC 濃度と C/N 比の値には特徴があることがわかる。そこで水の反射率から TOC 濃度及び C/N 比を推定する式を、重回帰分析を用いて求めた。

重回帰分析

複数の波長の反射率を説明変数、TOC 濃度と C/N 比をそれぞれ目的変数とし、重回帰分析を行った。重回帰分析を行う際、説明変数の数とどの説明変数を使用するかは分析者が任意に決定できる。本研究では、人工衛星での多バンド観測を念頭に置いているため、3~6 程度の説明変数を選択した。そして以下の 4 つの方法で使用する波長を決定した。このとき選択した波長を表 2 に示す。

表 2 重回帰分析に使用した波長。

Table 2 Wavelengths used for multiple regression analysis.

Estimation method	Wavelength [nm]
(1) Max and min	561,576,674,692
(2) Max correlation	523,599,630,680,720
(3) Max difference	581,598,640,691,693
(4) SGLI simulation	438~448, 485~495, 520~540,663.5~683.5

1) 極大・極小法

TOC 濃度が最大の場合と C/N 比が最大の場合のスペクトルにおいて、特徴的な部分である極大と極小を選択した。

2) 相関最大法

TOC 濃度及び C/N 比と反射率との相関係数を求め、その極大部分を選択した。

3) 差最大化法

TOC 濃度及び C/N 比が最大の場合と最小の場合のスペクトルの差をとり、その極大部分を選択した。

4) SGLI シミュレーション

本研究は人工衛星での観測を念頭に置いている。そこで GCOM-C に搭載予定の SGLI センサのシミュレーションを行った。SGLI が使用するバンドの幅だけ反射率を平均し、使用した。

重回帰分析の結果

表 3 に、重回帰分析によって求めた回帰式を示す。このとき目的変数を y 、説明変数を r_{xxx} (xxx は使用した波長) とする。回帰式より得られた推定値と、観測値との重相関係数と相対 RMS 誤差を表 4 に示す。表 4 より、TOC 濃度及び C/N 比推定の精度が一番良いのは (2) 相関最大法を用いた場合である。このとき、TOC 濃度推定の重相関係数は $R=0.71$ 、C/N 比推定の重相関係数は $R=0.67$ となった。また、TOC 濃度推定の相対 RMS 誤差は 24.74[%]、C/N 比推定の相対 RMS 誤差は 5.41[%] であった。図 1 に (2) 相関最大法を用いて波長選択を行った場合の、TOC 濃度及び C/N 比推定の推定値と観測値の散布図を示す。

表 3 TOC 濃度及び C/N 比の重回帰分析の結果.

Table 3. Result of multiple regression analysis of TOC content and C/N ratio.

Estimation method		Equation
(1) Max and min	TOC content [%]	$y=10.5r_{561}-13.9r_{576}+0.5r_{674}+4.0r_{692}+13.4$
	C/N ratio	$y=1.7r_{561}-2.2r_{576}+0.4r_{674}-0.9r_{692}+5.3$
(2) Max correlation	TOC content [%]	$y=-12.1r_{515}+9.9r_{523}-7.7r_{600}+17.7r_{630}-27.5r_{680}+32.6r_{720}+13.6$
	C/N ratio	$y=-0.2r_{515}+0.2r_{523}-0.2r_{599}+1.8r_{630}-2.7r_{680}-2.5r_{720}+5.1$
(3) Max difference	TOC content [%]	$y=25.1r_{581}-62.7r_{598}+10.2r_{640}-13.7r_{691}-47.5r_{694}+13.1$
	C/N ratio	$y=0.7r_{581}-1.8r_{598}-0.3r_{640}-7.7r_{691}+9.9r_{694}+5.6$
(4) SGLI simulation	TOC content [%]	$y=22.3r_{438-448}-24.2r_{485-495}-0.2r_{520-540}+8.0r_{663-683}+12.2$
	C/N ratio	$y=3.2r_{438-448}-3.5r_{485-495}+0.1r_{520-540}+1.7r_{663-683}+5.0$

表 4 重相関係数及び相対 RMS 誤差.

Table 4 Result of multiple correlation coefficient and Relative RMSE.

		(1) Max and min	(2) Max correlation	(3) Max difference	(4) SGLI simulation
Multiple correlation coefficient	TOC content [%]	0.43	0.71	0.58	0.49
	C/N ratio	0.61	0.67	0.62	0.66
Relative RMSE [%]	TOC content [%]	32.47	24.74	29.14	29.57
	C/N ratio	5.85	5.41	5.82	5.54

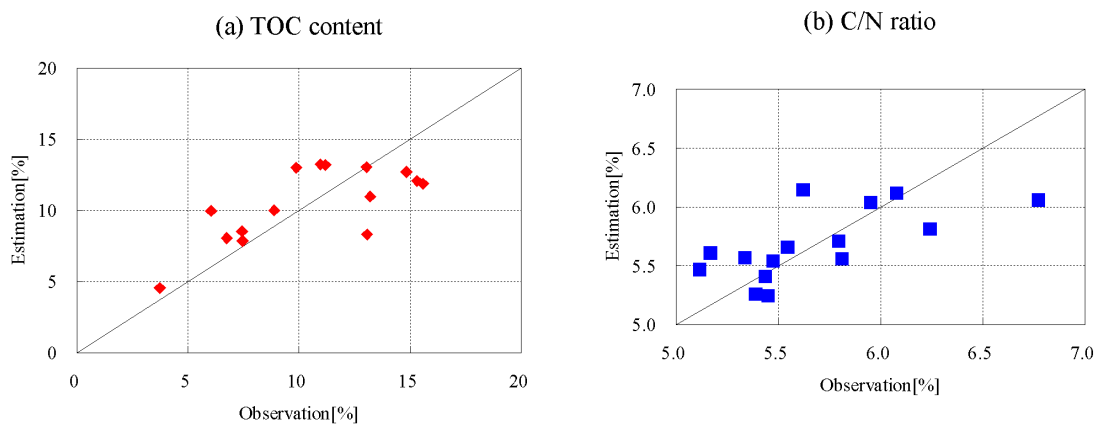


図 1 (2) 相関最大法を用いた場合の観測値と推定値の散布図. (a) は TOC 濃度, (b) は C/N 比
Fig. 1 Scatter chart of observation and estimation in (2) Max correlation. (a) TOC content, (b) C/N ratio.

懸濁物質起源推定

推定した TOC 濃度及び C/N 比から、懸濁物質の起源推定が可能であるかの検証を行うために、縦軸に TOC 濃度、横軸に C/N 比をとり、観測値、推定値、そして推定値の 95% 信頼区間を図示したダイアグラムを作成した。このとき表 1 より、プランクトンが主体の場合、河川からの流入が主体の場合、巻き上げが主体の場合の TOC 濃度と C/N が取り得る値の概略範囲を楕円で表している。図 2 に (1) 極大・極小法、(2) 相関最大法、(3) 差最大化法、(4) SGLI シミュレーションの 4 つの波長選択法で求めたダイアグラムを示す。また図 3 に、各方法で求めた推定値の 95% 信頼区間を示す。

各ダイアグラムの共通点として、TOC 濃度及び C/N 比より観測された懸濁物質は「プランクトン主体」と「湖底からの巻き上げ主体」の間をとる。この結果から、観測されたサンプルは、さまざまな起源の懸濁物質が混ざり合った状態であると考えられ、各起源が主体の場合の懸濁物質サンプルが存在していないことがわかる。

図 2、図 3 及び表 4 より、どの波長選択法を用いた場合でも、C/N 比推定は精度良く行えていると考えられる。そのため、TOC 濃度の推定精度が高いほど、懸濁物質起源推定を良く行えると考えられる。そこで、重回帰分析の結果及び、図 2、図 3 から総合的に判断して、(2) 相関最大法を用いた場合が最も懸濁物質起源推定を高精度に行えると考えられる。

これらの結果をまとめると、図 2 のダイアグラムの C/N 比推定値と、図 3 の C/N 比の 95% 信頼区間から、「河川からの流入が主体」とそれ以外の懸濁物質の判別は、精度よく行えると考えられる。一方、図 2 のダイアグラムの TOC 濃度推定値と、図 3 の TOC の 95% 信頼区間から、「プランクトンが主体」とそれ以外の懸濁物質の判別は、誤差が大きいがある程度は可能であると考えられる。(4) SGLI シミュレーションの場合においても、他の波長選択法と同様の結論が得られた。そのため、今後人工衛星搭載センサを用いた観測への応用について更に検討する必要がある。

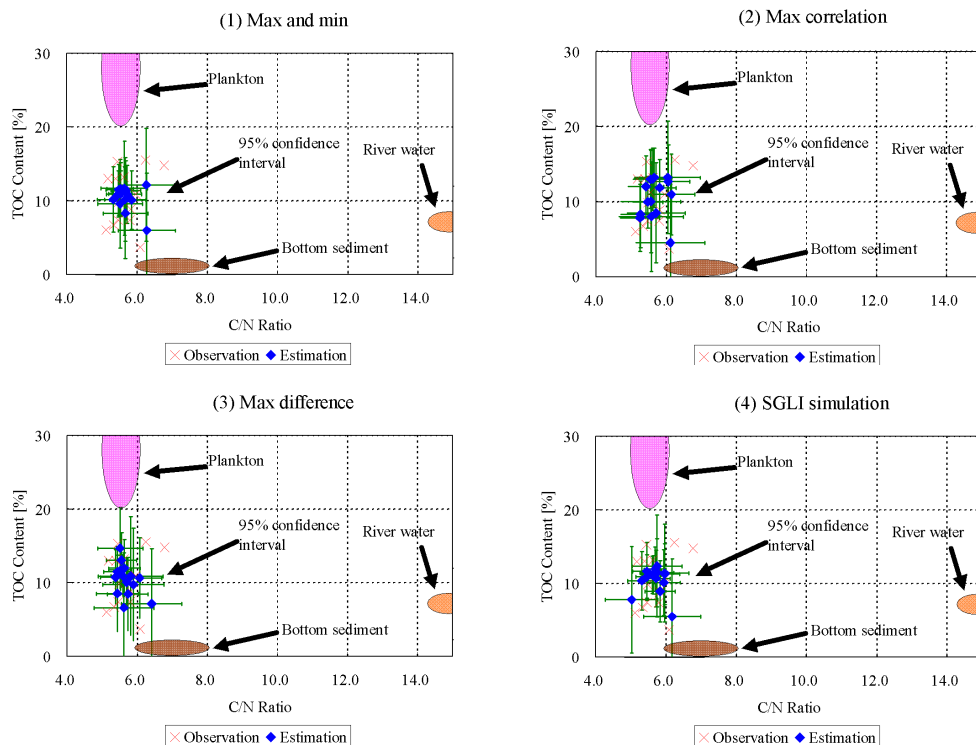


図 2 TOC 濃度と C/N 比のダイアグラム。

(1) 極大・極小法、(2) 相関最大法、(3) 差最大化法、(4) SGLI シミュレーション。

Fig. 2 TOC vs. C/N diagram.

(1) Max and min, (2) Max correlation, (3) Max difference, (4) SGLI simulation.

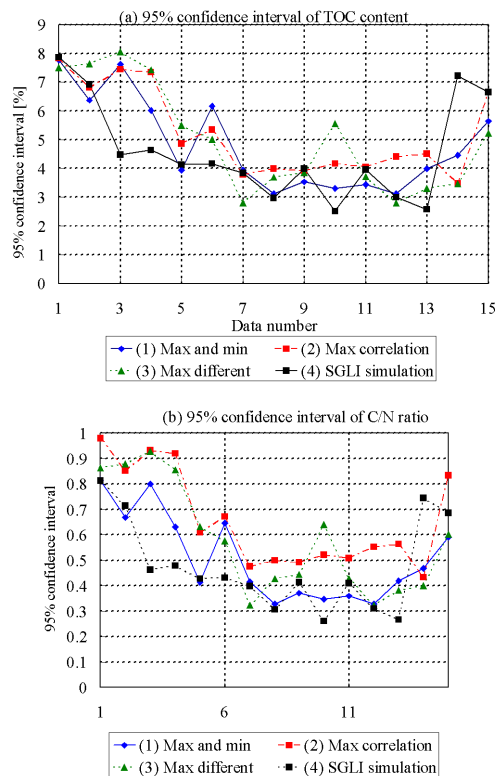


図3 推定値の95%信頼区間。(a),(b)はそれぞれTOC濃度及びC/N比に対する値を示す。

Fig. 3 95% confidence interval of estimation. (a) and (b) is 95% confidence interval of the TOC content and the C/N ratio.

まとめ

汽水域における、リモートセンシングによる懸濁物質起源推定の基礎研究を、分光放射計で観測したデータを用いて行った。水の分光反射率を説明変数、TOC濃度及びC/N比を目的変数とし、重回帰分析を行った。このとき説明変数を(1)極大・極小法、(2)相関最大法、(3)差最大化法、(4)SGLIシミュレーションの四つの方法で選択した。その結果、(2)相関最大法が最も高精度にTOC濃度とC/N比を推定できることがわかった。図2と図3のダイヤグラムと95%信頼区間を考慮すると、「河川からの流入が主体」とそれ以外の懸濁物質の判別は、精度よく行えると考えられる。「プランクトンが主体」とそれ以外の懸濁物質の判別は、誤差が大きいがある程度は可能であると考えられる。これは汽水域の水質リモートセンシングに新たな可能性を開くものである。

現在、取得されたサンプル中に各起源が主体の懸

濁物質サンプルが存在しないため、今後は様々な組成の観測データを増やす必要がある。また、今回行ったシミュレーションではパスラジアンなどの大きな誤差要因は考慮されていないため、これらを考慮したSGLIなどの人工衛星搭載センサを用いた観測への応用を検討する必要がある。

引用文献

- Bordowskiy, O. K. (1965a) Source of organic matter in marine basins. *Mar. Geol.* 3: 5-31.
- Bordowskiy, O. K. (1965b) Accumulation of organic matter in bottom sediments. *Mar. Geol.* 3: 33-82.
- Ertel, J. R. and Hedges, J. I. (1984) The lignin component of humic substances: Distribution among soil and sedimentary humic, fulvic, and base-insoluble fractions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48: 2065-2074.
- Hedges, J. I., Clark, W. A., Quay, P. D., Richey, J. E., Devol, A. H. and Santos, U de M. (1986) Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River. *Limnol. Oceanogr.* 31: 717 - 738.
- 小山忠四郎 (1980) 生物地球化学—環境科学への基礎と応用—。東海大学出版会, 258p.
- Meyers, P. A. (1997) Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes *Organic Geochemistry*, Volume 27, Pages 213-250.
- Müller, P. J. (1977) C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41: 765-776.
- Prahl, F. G., Bennett, J. T. and Carpenter, R. (1980) The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington. *Geochim. Cosmochim. Acta* 44: 1967-1976.
- 作野裕司・山本正智・吉田武史・松永恒雄・古津年章・下舞豊志・高安克巳 (2004) 多時期 ASTER データを用いた宍道湖・中海の濁度・クロロフィル a 濃度推定. *LAGUNA*, 11: 147-153.
- 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: 113-119.
- Sampei, Y. and Matsumoto, E. (2001) C/N ratios in a sediment core from Nakaumi. lagoon, southwest

多波長リモートセンシングによる汽水域懸濁物質起源推定—中海・宍道湖を例として—

Japan. Geochem. Jour., 35: 189-205.

宇宙航空研究開発機構 地球観測研究センター
(2010)

http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/index_j.html.

山本周一郎・古津年章・下舞豊志・野々原伸吾・
作野裕司 (2007) MODIS による宍道湖・中海の
濁度分布推定. LAGUNA, 14: 57-68.