

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

ESTIMATION OF THE TURBIDITY DISTRIBUTION USING SATELLITE
"DAICHI" DATA IN HONJO AREA OF LAKE NAKAUMI

作野裕司¹
Yuji SAKUNO

¹正会員 工博 広島大学助教 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

In West Channel around the Honjo area of Lake Nakaumi, the monitoring of dike removal and the estimation of turbidity distribution using satellite "Daichi" (ALOS) AVNIR-2 sensor data was tested. Turbidity was estimated by a simple statistical model using satellite/in-situ data set. The AVNIR-2 data used is four scenes from August, 2006 to September, 2007. As a result, the following matters were clarified. The condition of dike removal in West Channel of Honjo area was monitored from the satellite image clearly. A statistically significant correlation ($r=0.79$ and $r=0.88$) was observed between reflectance of AVNIR-2 Band 4 (760-890nm) and surface turbidity.

Key Words : remote sensing, AVNIR-2, turbidity, reflectance, Lake Nakaumi

1. はじめに

島根県に位置する中海本庄水域(旧本庄工区)は2002年12月に、1963年4月から約40年継続した国の干拓事業¹⁾中止が決定された。そして2007年5月からは西部承水路堤の撤去工事が始まった。今後、西部堤防撤去及び東部森山堤開削の工事が完了すれば、同水域の水質が激変する可能性があり、多分野による継続的かつ詳細なモニタリング調査が求められている。

一方、筆者らは時空間的な水質変動の激しい宍道湖中海における広域水質把握のため、1995年から現在まで衛星リモートセンシングによる水質モニタリング技術の開発を継続的に行ってきた。その間、SPOT/HRVやLandsat/TMによる表層Chl. a分布推定式やTerra・Aqua/MODISによる低解像度Chl. a推定式等の開発を行った²⁾³⁾⁴⁾。しかし、優れた解像度を持ち比較的安価な国産衛星「だいち」を使った同水域の水質環境モニタリング研究は筆者を含め他の研究者もまだ行っていない。

以上のような背景から、本研究では本庄水域の堤防撤去前及び工事中における広域的な水質分布把握の一環として、2006年5月末のデータから利用が可能となった衛星「だいち」に搭載された10mの解像度を持つ可視・近赤外センサ「AVNIR-2」データを使って、2007年度の中海本庄水域における西部承水路堤撤去工事のモニター及び濁度分布特性の評価を

行うことを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 研究地域について

中海は、島根県と鳥取県の県境にある汽水性の湖沼である。図-1に示すように本庄水域は中海北部にあり、広さは周囲5km四方程度(中海全体の約17%を占める)、水深は約4-6mである。本庄水域の西部には西部承水路堤と呼ばれる岸辺に平行して沖合約200~300mに作られている堤防があり、2007年4月以前にはこの堤防で囲まれた西部承水路の切れ込み2カ所(幅約190m、水深4m)からのみ中海本体と水の交換がなされてきた(図-1の矢印が中海本体からの水の流入経路を示す)。なお、2008年度中には東部の森山堤防(3.1km)を60m開削し、橋を架けることが決められている¹⁾。

以上のように2007年4月以前の本庄水域は非常に閉鎖性の強い水域を形成していた。しかし、同水域は一般に中海本体よりも良好な水質(高い透明度等)を保っていることが知られている⁵⁾。これは同水域周辺には4つの小河川があるのみで河川からの栄養塩供給が少ない(本庄水域への栄養塩の供給は中海上層水の一部に限られる)⁵⁾のが良好な水質を保つ大きな理由とされている。ただし、1998年のように栄養塩が十分にありながら、クロロフィルa濃度(Chl. a)が低い等、今なお本庄水域の水質変

動メカニズムの解明には課題が多い状況である。

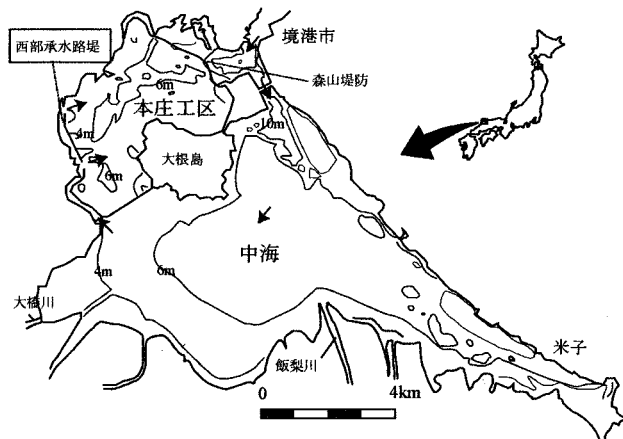


図-1 中海本庄水域及び堤防の位置

(2) 衛星「だいち」データについて

本研究で用いる衛星「だいち」とは、2006年1月24日に宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって打ち上げられたALOS（Advanced Land Observing Satellite）の愛称である。ALOSには、AVNIR-2（Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2）と呼ばれる解像度10mの可視・近赤外4バンドからなるセンサが搭載されている。AVNIR-2センサの諸元を表-1に示す。

表-1 ALOS/AVNIR-2の基本性能

バンド	Band1 : 420-500nm Band2 : 520-600nm Band3 : 610-690nm Band4 : 760-890nm
解像度	10m (直下)
観測幅	70km
量子化	8ビット

(3) 衛星による濁度推定法と反射率変換方法

衛星データから濁度（又はSS）を推定する研究は比較的早くから（1970年代から）行われており⁶⁾、その推定方法はChl. a等と比べると簡単である。即ち、水中の物質が増加すると、一般には可視・近赤外域（実際には経験的に赤～近赤外域等の長波長が使われることが多い）の反射率も増加する⁷⁾⁸⁾⁹⁾。画像強度の強弱（反射率に相当）が濁度（又はSS）に比例すると仮定し、以下のような一般式で表わされる。

$$Turb = \alpha R_{\lambda} + \beta \quad (1)$$

ここで、 $Turb$ は濁度（又はSS）、 R は反射率、 λ は波長、 α および β は定数を表す。本研究ではAVNIR-2による濁度推定式を開発するために、統計的な方法により式(1)の α および β を決定する。

式(1)の定数 α および β を統計的に決定するためには、衛星データから得られる R と実測濁度のデータセットが必要である。このうち衛星データ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、比較的簡単に衛星水質推定の研究に古くから使われている以下の式(2)¹⁰⁾に従って反射率変換を行った。

$$R_{\lambda} = (\pi L_{\lambda} d^2) / (ESUN_{\lambda} \cos \theta_z) \quad (2)$$

ここで、 R_{λ} は反射率（後述する図では100をかけて100%表示にしている）、 L_{λ} は衛星データから得られる放射輝度（ $W/m^2/sr/\mu m$ ）、 d は太陽-地球間距離（天文単位）、 $ESUN_{\lambda}$ は大気圏外分光放射照度（ $W/m^2/\mu m$ ）、 θ_z 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_{λ} 変換は、以下のような変換式とAVNIR-2データのヘッダーに書かれている表-2の変換係数に基づいて計算した。

$$L_{\lambda} = a DN_{\lambda} + b \quad (3)$$

ここで、 a 、 b は放射輝度変換係数（表-2）をそれぞれ表す。また、太陽天頂角は次式¹¹⁾から求めた。

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (4)$$

ここで、 ϕ は観測地の緯度（°）、 δ は赤緯（°）、 h は時角（°）である。このうち、 ϕ は画像の中心緯度、 δ および d はIqbal¹¹⁾の推定式（年月日および時刻の関数）を、 $ESUN_{\lambda}$ は村上らの文献値¹²⁾（AVNIR-2の波長応答によって重み付けした分光太陽照度）をそれぞれ用いた。以上のようにして求められたAVNIR-2データの $ESUN$ の値を表-3に示す。

表-2 AVNIR-2の放射輝度変換係数

Band	1	2	3	4
a	0.588	0.573	0.502	0.835
b	0	0	0	0

表-3 AVNIR-2波長域の大気圏外放射照度 (ESUN)

Band	1	2	3	4
ESUN ($W/m^2/\mu m$)	1959	1851	1546	1061

ところで式(1)で得られる反射率は、大気の影響を受けており、一般に大気補正を行わなければ、真の反射率と比較することはできない。一方、沿岸部において、衛星データから厳密な大気補正を行うことは、大気パラメータの決定等が複雑で、一般に非

常に難しいのも事実である。そこで、本研究では、湖沼の水質解析等によく用いられ、簡便であるが多くの論文で大気補正効果が認められている暗画素法¹⁰⁾と呼ばれる大気補正法を用いて、AVNIR-2データの大气補正を行った。ここでいう暗画素法とは、画面内の最も暗い画素（一般に清浄な海域の値が使われることが多い）の値をパスラジアンズと呼ばれる大気ノイズ成分として衛星観測した各バンドの値から差し引く方法である。実際の大气補正には、研究水域周辺の暗い海域の画素値をパスラジアンズ L_{pa} と仮定して、式(1)の L_a の値から L_{pa} の値を差し引く処理を行った。またDN抽出にはノイズを低減するために、3*3画素の平均化処理も行った。

3. 使用データ

今回研究に使用した AVNIR-2/実測濁度データセットは表-4に示す通り、2006年8月～2007年9月までの4時期のデータである。また、比較に使用した実測データは、表-5に示す宍道湖湖心・中海湖心・米子湾の3カ所に設置された国土交通省自動水質観測所における午前11時の表層濁度データ（測定法：積分球式）である。なお、AVNIR-2はいずれの日も日本時間の午前11時±3分以内に取得されたデータであり、データセット間の時間のずれは無視できると仮定し、処理を行った。

表-4 使用したAVNIR-2/現場データセットの概要

日付	衛星観測時刻	$\cos \theta_z$	d	濁度 (mg/l)	N
2006/8/3	10:57	0.93	1.01	8-10	2
2007/2/20	11:00	0.68	0.99	24	1
2007/5/23	11:03	0.95	1.01	1	1
2007/9/21	10:59	0.81	1.00	2-8	3

表-5 国土交通省自動水質観測点の概要

名称	松江	中海湖心	米子湾
緯度	35° 28' 03"	35° 27' 59"	35° 25' 55"
経度	133° 03' 19"	133° 11' 29"	133° 18' 01"
計測精度	±5%	±2%	±2%
測定水深	1m	1m	1m

4. 結果及び考察

(1) 「だいち」による堤防撤去工事モニタリング

図-2は2007年5月、9月、2008年1月における西部承水路堤の撤去工事現場付近のAVNIR-2バンド4（近赤外画像）の画像である。これより図中A地点の堤防は9月までには撤去され、翌年1月にはA、B付近の堤防は完全に撤去されている様子がよく

わかる。実際、A地点の堤防撤去工事前後は図-3の写真（筆者撮影）のようになっていた。この堤防撤去により、中海水が以前よりも直接的に本庄水域の内部へ流入すると考えられる。

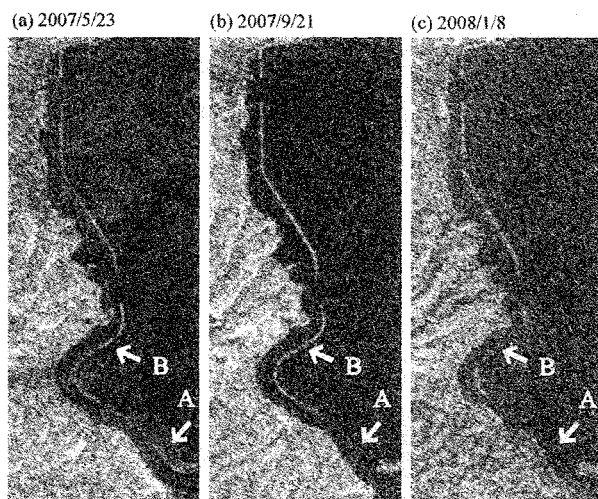


図-2 西部承水路堤撤去中のだいち画像

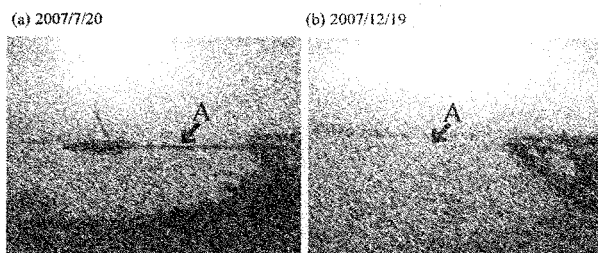


図-3 西部承水路(A)撤去前後の写真（筆者撮影）

(2) 「だいち」による濁度推定結果

表-6はAVNIR-2センサから計算されたバンド2の反射率と実測濁度の相関係数を示している。これより、Band2、Band3、Band4でいずれも有意な（ $\alpha=0.01$ ）相関が得られている。図-4は、実測データと簡易大気補正後の衛星反射率データの相関解析の結果、最もよい相関がよかったBand2とBand4の関係を示している。図-4(a)をみると、Band2と濁度の関係は、2/20の松江測点（MT）を除くと両者は無相関となる。一方、Band4と濁度の関係は2/20の松江測点（MT）を除いても、相関係数は低くなるものの、依然有意な相関（ $R=0.57$, $N=6$ ）が得られる。このことから、少なくとも今回のAVNIR-2データから濁度を推定する方法として、Band2の方法よりもBand4が優れていると考えられる。実際、筆者らがASTERデータを使って宍道湖・中海の濁度推定を予備的に行った結果も、近赤外バンドと濁度はどのバンドよりも高い相関が得られた¹³⁾。

世界的には同様な方法でLandsat/MSSやTMデータと濁度（又はSS）の相関解析が行われ、チコット湖（近赤外バンドの相関： $R=0.63$, $N=310$ ）¹⁴⁾やミシガン湖・グリーン湾（近赤外バンドの相関： $R=0.59$, $N=70$ ）¹⁰⁾でも、有意な相関が得られている。以上の

ことから、AVNIR-2センサの近赤外波長域 (AVNIR-2) による濁度推定も妥当な結果であると考えられる。ただし、近赤外の反射率は水の吸収の影響で非常に低いため、低濃度の濁度推定には特に注意が必要だと思われる。

なお、本研究で最終的に得られた濁度推定式は以下の通りである。

$$Turb = 9.7 R_{AVNIR-2_Band4} - 1.3 \quad (5)$$

または、

$$Turb = 1.6 \exp(1.3 R_{AVNIR-2_Band4}) \quad (6)$$

式(5)、式(6)による濁度推定誤差 (RMSE) は、それぞれ 4.6mg/l、3.6mg/l と計算された。

表-6 AVNIR-2 各バンド反射率と濁度の相関係数

	Band1	Band2	Band3	Band4
濁度	0.16	0.80*	0.67*	0.79*

* $\alpha=0.01$

N=7

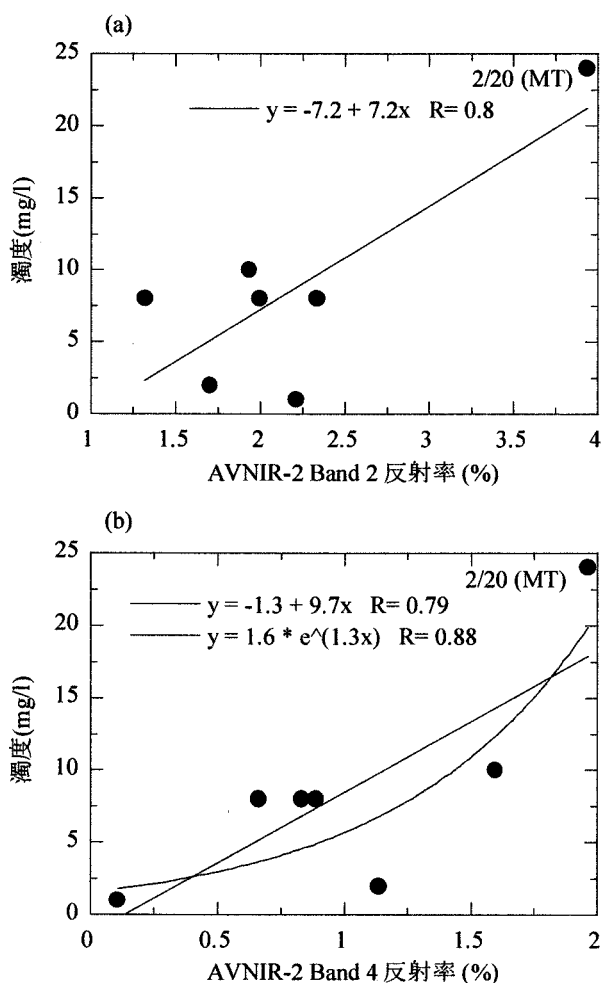


図-4 衛星濁度と実測濁度の関係

(3) 「だいち」による本庄水域の濁度分布評価

図-5 は、図-4 の回帰式を使って中海本庄水域

に雲やノイズが少ない2007年2月と9月のだいち画像から推定した濁度分布図である。また、図-5のa, b, c, d地点の推定濁度の比較を図-6に示す。これより、濁度分布の観点からは、本庄水域の濁度は2時期とも西部承水路内(b)と比較して6~8mg/lと衛星による濁度推定誤差を超える差があることから、本庄水域内は承水路と比べると相対的に低濃度であることがわかる。しかし本庄水域と中海本体との有意な差は認められなかった。このような濁度分布傾向を検証するデータとして、次の2種類の実測結果があげられる。まず2月の濁度分布傾向として2007年2月26日に島根大学汽水域研究センターが観測した濁度分布(図-7)において、西部承水路と本庄水域内外で平均5.0FTU(3.5 mg/l)の差があり、本庄水域と中海本体では平均6.4FTU

(約4.5mg/l)の差がある。また今回9月の濁度分布傾向のデータは入手することができなかったが、筆者らが1997年9月と10月におこなった現地調査結果に基づく中海のSS分布(図-8)では中海本体と比べ本庄水域が低濃度傾向にあった。これらの結果から、西部承水路と本庄水域の比較では衛星から本庄水域の低濁度傾向が読み取れるが、本庄水域と中海本体の濁度の差は読み取ることが難しいことがわかる。

一方、時期的な濁度の濃度差の観点から衛星濁度データから2月と9月を比べると、最大でも4mg/lの濃度差があり、衛星の推定誤差を考慮すると両時期は同程度の値といえる。島根大学理学部分析化学教室が調査¹⁵⁾した1993年~1997年の5年間における、中海湖心と本庄水域の平均値と変動係数(CV: [標準偏差/平均値]*100)の経月変化(図-9)と比較すると9月の方が平均的には10mg/l程度低い値を示している。このような衛星データと実測データの時期による濃度差傾向の違いは、衛星の濁度推定誤差が大きいことに起因していると考えられる。なお、図-9の2月のCVは9月と比べ非常に大きい

(90%)ことから、必ずしも2007年9月が同年2月と比較して低い傾向にあったともいえない点は注意すべきである。ただし2章で記述したように従来、本庄水域は流入河川が小規模でかつ堤防の影響により汚濁物質の流入が少なく、塩分躍層も形成されないことから、比較的良好な水質環境を維持してきたと言われている。最近、本庄水域の貧酸素化が現れ始めたという報告もあるが¹⁶⁾、衛星から推定した濁度分布や過去の実測データを総合すると、堤防撤去工事直前及び初期工事中(2007年9月現在)において西部承水路又は中海本体と比較して本庄水域は少なくとも同程度か低濁度分布傾向にあることは十分予測される。

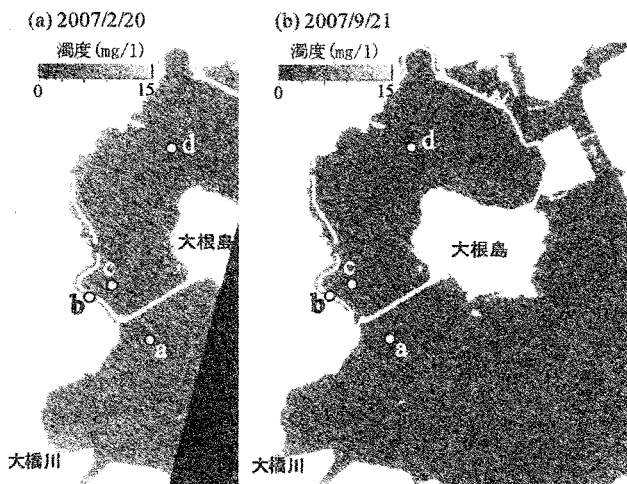


図-5 衛星濁度分布図例 (2月と9月)

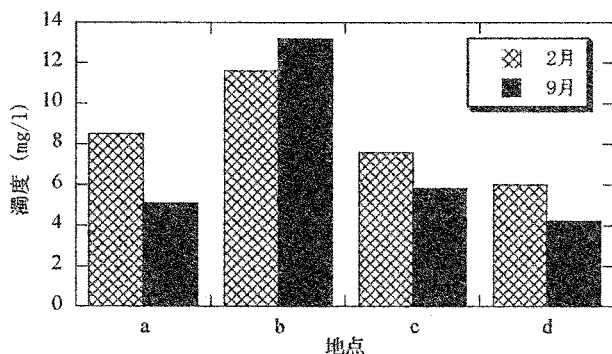


図-6 本庄水域と中海本体の衛星濁度比較

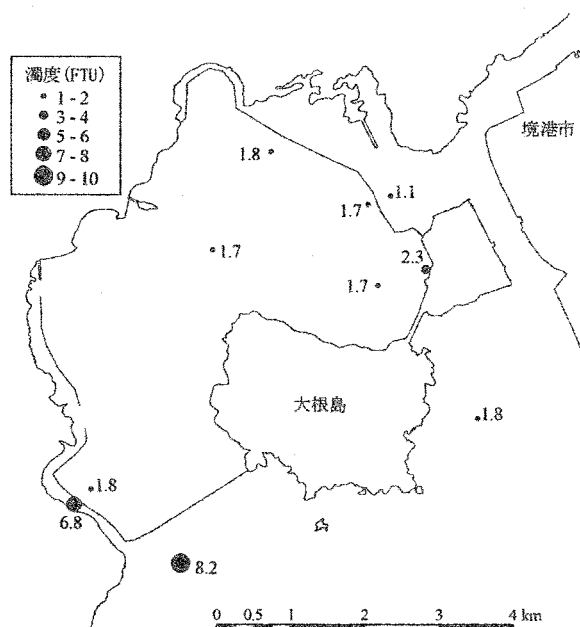


図-7 2007年2月26日の本庄水域実測濁度分布 (島根大学汽水域研究センター測定)

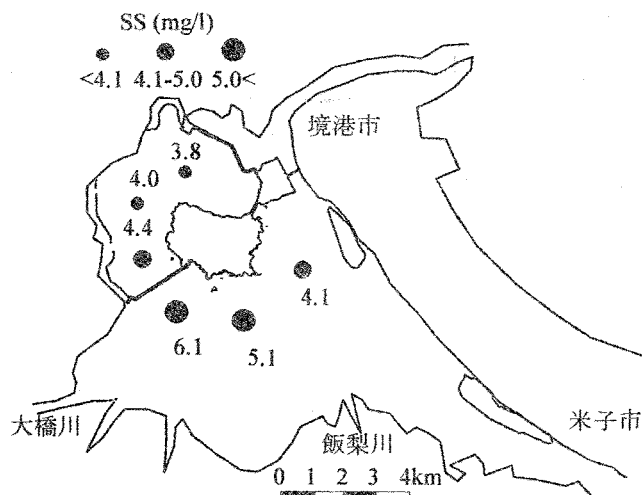


図-8 本庄水域と中海本体の実測SS分布 (1997年9月, 10月の3日間平均)

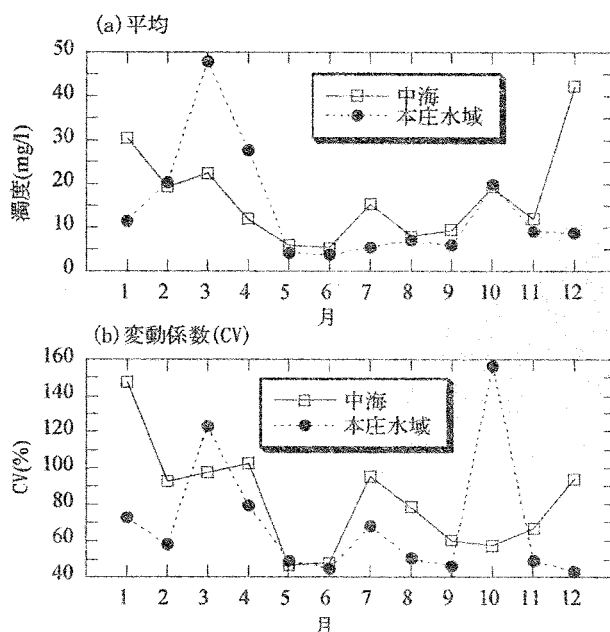


図-9 本庄水域と中海本体の実測濁度の経月変化 (1993年～1997年の5年間平均及び変動係数)

5. まとめ

本研究は、衛星「だいち」のAVNIR-2データを使って、中海本庄水域の西部承水路撤去工事直前及び工事中における堤防のモニターおよび濁度分布の推定を試みた。その結果、本研究により得られた主要な結論は以下のとおりである。1) 衛星「だいち」の画像から、本庄水域西部承水路堤撤去工事の進捗状況が明瞭に確認できた。2) AVNIR-2 Band4 (近赤外波長域)の反射率と濁度には有意な相関があった。3) AVNIR-2による現時点の濁度推定方法では濁度推定誤差が4mg/l程度と大きいため、中海本体と本庄水域の濃度差、時期的な濃度差等を識別することは難しかった。

今後は、さらに衛星／実測データセットを増やし、本方法の推定精度を検証するとともに、より濁度推定精度を上げるための大気補正手法や水域の微細な輝度情報を得るために量子化の高い衛星データ（Terra・Aqua／MODIS）の活用手法等を検討するつもりである。また、2007年度末までに西部承水路堤の撤去工事はほぼ終了し、現在行われている本庄水域東部の森山堤防の開削工事も完了すれば、本庄水域の水質分布も大きく変動することが予想される。従って、本研究で得られた方法を活用し、衛星データによる同水域の面的な水質モニタリングを定期的に行い、今後の水環境対策の議論のための基礎データを作成したいと考えている。

謝辞：本研究で使用した衛星データは、JAXA と筆者らの共同研究「ALOS データ利用公募型研究（第2回公募）」（PI：作野裕司）の一環として行われ、JAXA から AVNIR-2 データの提供を受けた。また、2007 年の中海現地データを島根大学汽水域研究センターの瀬戸浩二准教授に提供いただいた。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 浅野敏久：宍道湖・中海と霞ヶ浦、環境運動の地理学、古今書院、2008。
- 2) 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：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、1999。
- 3) 作野裕司、吉田武史、松永恒雄、中山大介、高安克己：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、2003。
- 4) Sakuno, Y., Ehara, R., and Kunii, H.: Monitoring red tide bloom using MODIS data in Lake Nakaumi, Japan, *Proceedings of Asian and Pacific Coasts 2005*, pp.571-574, 2005。
- 5) 清家泰、奥村稔、藤永薫、大谷修司、千賀有紀子、岡宏樹：中海本庄水域の水質特性、LAGUNA（汽水域研究）、pp. 1-9、1999。
- 6) Ritchie, J. C., Schiebe, F. R., McHenry, J. R.: Remote sensing of suspended sediments in surface waters, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42(12), pp.1539-1545, 1976。
- 7) Novo, E. M. M., Hansom, J. D., and Curran, P. J.: The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1283-1289, 1989。
- 8) Novo, E. M. M., Hansom, J. D., and Curran, P. J.: The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1357-1372, 1989。
- 9) Han, L.: Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algal-laden waters, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 701-705, 1997。
- 10) Lathrop, R. G., Lillesand, T. M. and Yandell, B. S.: Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters, *International Journal of Remote Sensing*, 12, 2045-2063, 1991。
- 11) Iqbal, M.: An introduction to solar radiation, Academic Press, 390p, 1983。
- 12) 村上浩、田殿武雄、島田政信：大気上端反射率の方向性関数を用いたAVNIR-2とMODISの輝度相互校正、日本リモートセンシング学会誌、27(4)、pp. 354-362、2007。
- 13) 作野裕司、山本正智、吉田武史、松永恒雄、古津年章、下舞豊志、高安克己：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（汽水域研究）、11、pp. 147-153、2004。
- 14) Hinton, J. C.: Application of eigenvector analysis of remote sensing of coastal water quality, *International Journal of Remote Sensing*, 12(7), pp.1441-1460, 1991。
- 15) 島根大学理学部化学科環境分析化学研究室：宍道湖・中海水質月報、1993-1997。
- 16) 島根大学汽水域研究センター・汽水域重点プロジェクトチーム：今中海（本庄水域）で何がおこっているのか？、本庄水域に関する討論会資料、2007。