多時期の衛星情報による手賀沼の水質浄化の時系列解析
- ハイパースペクトル計測結果を踏まえて -

日大生産工　○岩下圭之、大木宜章　University of California, Santa Barbara校　Jeff Dozier

1. Introduction

本プロジェクトでモデルケースとしている千葉県北西部に位置する手賀沼およびその流域(***Photo 1***) は、昭和 40 年代から急激な都市開発が進み土地利用が変貌を遂げてきた典型的な都市型サブアーバン色が強く、環境に対する対応ならびに意識の欠如から、長年、水質汚濁ワーストと位置づけられてきた湖沼である。1993 年には「環境基本法」及び「水質汚濁防止法」が改定され行性的な対応は施行されて入るが、水の流動が弱い閉鎖性水域であるため、自己浄化能力が低く依然として有機物による富栄養化現象が問題視されている。水質環境対策として、沼水を北千葉道水路を通じて流動化させることによる滞留時間の短縮や，法律の制定に加え自治体活動による周辺住民や事業者への啓発により，環境に対する意識の向上努力などがあげられるが、未だ環境基準に充たしおらず、半閉鎖性水域特有の富栄養化状態であるのが現状である。排水負荷量に依存する同水域においても、富栄養化の主要因は現在においても生活排水がトップにあげられることから、さらなる住民に対する意識改革の必要が窺える。

本論は、本プロジェクトにおけるこれまでの研究成果より得られた Chlorophyll-a(以降 Chl.-a) 含有水のスペクトル特性に関する知見を基に、Chl.-a の発生に大きく関与している浮遊懸濁物質（Suspended Solid：SS），また水質指標の一つである化学的酸素要求量（Chemical Oxygen Demand：COD）との相関を明らかにするとともに、多時期のマルチスペクトル衛星情報を利用して、Chl.-a・SS・COD を対象とした富栄養化指数（Trophic State Index; 以降 TSI）評価画像を作成し、研究対象水域である千葉県手賀沼の富栄養化状態の変貌を時系列的に評価する手法を提案することを目的とした。

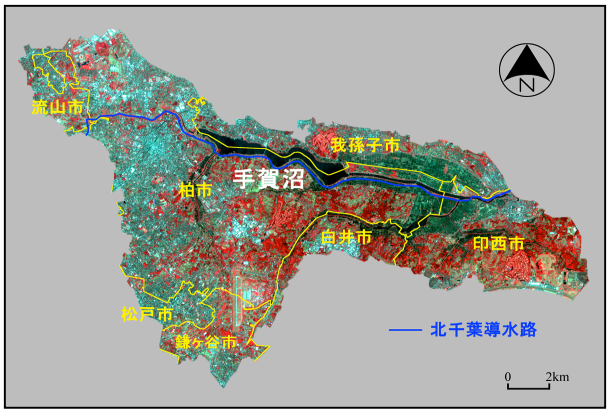

Photo 1 Satellite Imagery of the Teganuma basin

2. Hyper-Spectral Feature of Water Body

2-1. Hyper-spectral on pre-verification work

本研究では、本学部図書館横の池を利用した予備実験結果および定点水質観測項目より富栄養化指標の主要項目である Chl.-a を対象に解析を行った。なお、近年，水質汚濁との関与の強い SS 濃度が Chl.-a の生育に大きく起因していることが明らかにされている．これは，SS 構成成分には Chl.-a の栄養源である有機物が多く含まれていることから，予備実験より、Chl.-a と SS の相互関係をハイパースペクトル測定結果を媒介として明らかにする必要がある。また，水質指標の一つである COD についても同様な解析を行った．なお、測定は以下の水質項目とし、ハイパースペクトル反射測定には Field Spec:350nm-2500nm「ASD 社製」を使用した。

＜図書館横予備実験項目＞

①固形肥料の散布、②電解処理によるアオコの死滅（フロッグ化・湖液分離「アオコの故意の減少」）
③Chl.-a 含有量の測定 ④SS・COD の測定
⑤ハイパースペクトル測定

Time-series Environmental Analysis on Water Body Purification of the Teganuma
- on the basis of Hyper-Spectral measurement works -

Keishi Iwashita, Takaaki Ohki and Jeff Dozier

2-2. Field Works at Site-Surerying of the Teganuma

現地調査は手賀沼内に設置された 18 ヶ所の調査地点（**Fig.1**）において船上からの資料水の採取，ならびに下記に示す 8 項目の調査を行った．なお，この現地調査データは千葉県と共同で衛星観測日と同期して定期的に行っている定点観測により得られたものである。なお，資料水採取の採取深度は米国 EPA と日本環境庁規定の湖沼や貯水池の表層水 1.5 ft＝約 0.5m を採用した．

本論では、2007 年 6 月 1 日に観測した定点観測／測定データを利用した。

＜定点観測項目＞

①気温・水温、②濁度、③Seci_disk による透明度
⑤COD 分析、⑥N-ヘキサン分析、⑦クロロフィル濃度分析、
⑧直下測定のハイパースペクトル

2-3. Spectral Feature of Water Body

構内実験池における予備実験の測定結果（Chl.-a 含有水が示すスペクトル特性、同地点の湖水の化学分析結果）をもとに相関解析を行った結果、以下のような知見を得た。

1）Chl.-a 濃度が増すほど、Chl.-a の示すスペクトル波形は可視赤(VR;680nm 近辺)における吸収が顕著となり、逆に近赤外(NIR)のローバンド域（700-730nm)の反射が強くなるという「植物的」なレスポンスを確認できる（***Fig.2***）。

2）Chl.-a 濃度が 100 μ g/l 以下の場合、水表面反射および含有 SS(浮遊懸濁物質)の影響を受けやすくなり、スペクトルピークが VG(可視視緑)に若干移動る傾向が見られるため、従来通りの推定モデルである Gordon 法も同時に検討した。超高濃度 Chl.-a 特を対象にスペクトル評価を行う場合、昨年同様 120,g/L を境にして RVI 法（NIR/VR）を利用する方が適切であることが確認できた（***Fig.3***）。

3）***Fig.4*** および ***Fig.5*** は Chl.-a と SS および CO との相関解析結果を示したものである。いずれも極めて良好なリニアな相関を確認することができ、COD および SS が大きく Chl-a 生成に大きく関与していること伺える。これらの関係はマルチスペクトル衛星データを利用してこれら広域に於ける汚濁水域の解析／評価を行う際のバンドセレクションならびに基本的根拠を得ることができた。

4）***Fig. 6*** は、衛星データの観測日と同期しておこなわれた手賀沼定点観測結果をもとに、予備検証実験と同様の相関解析を行った結果を示したものである。

Fig. 1 Outline of Ground-truth on field works

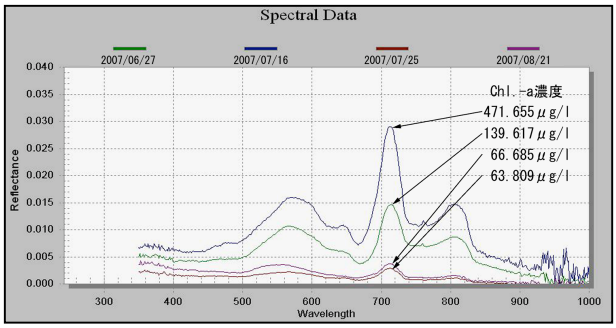

Fig.2 Representative reflectance spectra impacted by in the difference of Chl.-a content(pre-verification work)

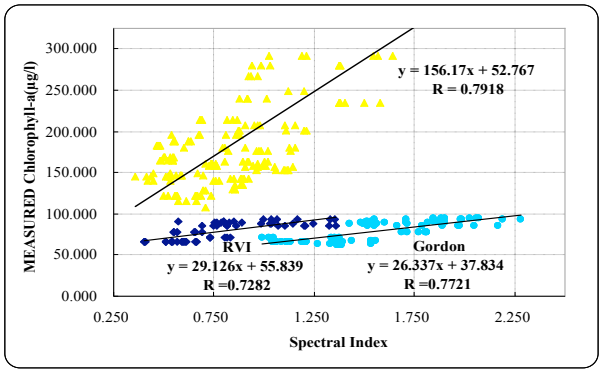

Fig.3 Comparison between Measured Chl.-a and Spectral Index (pre-verification work)

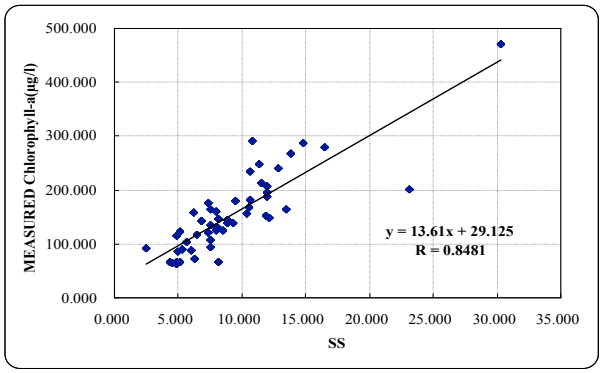

Fig.4 linear correlation of Chl.-a vs COD (pre-verification work)

3. Time-series Satellite Analysis for Environmental Change at the Teganuma

本研究において利用した衛星データは 2007 年 5 月 4 日、2006 年 5 月 1 日観測の ASTER L1B VNIR データおよび、1997 年 7 月 3 日観測の LANDSAT TM、1972 年 11 月 26 日観測の LANDSAT MSS データである。なお，水域の富栄養化状態を多重パラメータ指数として簡便にかつ正確に評価するために、1977 年に Kent State Univ.の Carlson 博士が構築した「富栄養化指数 TSI : Trophical State Index」法を本研究にも応用し，各水質項目の TSI 評価を行なった.

1) 基本処理（マスキング・幾何補正・輝度補正）
2) 複合ラジオメトリック補正法(Filament-Shaped 法) の内、Bright Control Noise Removal と Smoothing 処理

なお、ASTER Level1B VNIR データは、既にプロダクト補正済の反射率データであるため、2）のみを施した。

5-1. Land-use Change Analysis

水質汚濁の一要因である土地利用の変化について 1997 年から 2006 年に至るまで大きな土地利用の変化がないことから、開始年度 1972 年および解析年度 2006 年の約 35 年のスパンで解析した。***Photo 2*** は 1972 年 11 月 26 日観測の LANDSAT MSS データ、また 2006 年 5 月 1 日観測の ASTER L1B データを利用して、手賀沼流域の土地利用の時系列的変化を分類判読したものである。昭和 50 年代前半より急速に宅地化が進行し、平成のバブル期をピークとして開発により大きく変化を遂げてきた地域である。

5-2. TSI Imagery Based on Methodology with Field Works Spectral Concept

1）前述の Gordon 法ならびに RVI 法を基本に 1972 年・1997 年・2006 年・2007 年に観測の各衛星データを用いて各水質項目の式を回帰式として各衛星データのバンド情報にフィードバックすることにより作成された TSI 評価画像を **Photo3, 4** および **5** に示した。

2）1972 年観測の Landsat MSS データは時期的に「湖沼水質保全特別措置法」に基づいた指定湖沼となる前ということもあり，農業・生活排水流入に起因する超高濃度の Chl.-a が沼全体に分布している．これに比べ制定後の 1997 年観測の Landsat TM データからはいずれの水質においても全体的に著しい改善が伺える。

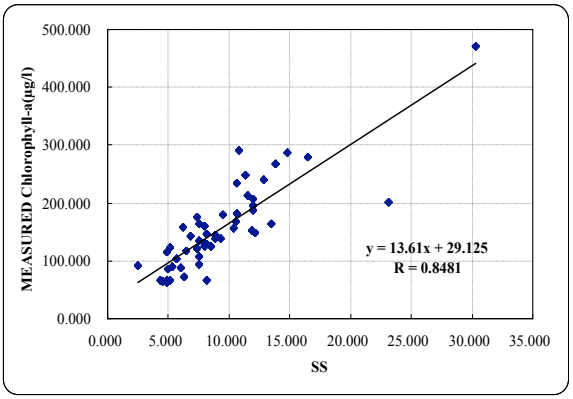

Fig.5 linear correlation of Chl.-a vs SS (pre-verification work)

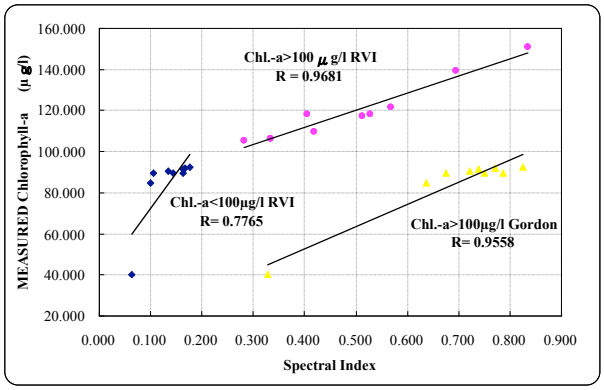

Fig.6 Comparison between Measured Chl.-a and Spectral Index(at Site-Surerying of the Teganuma)

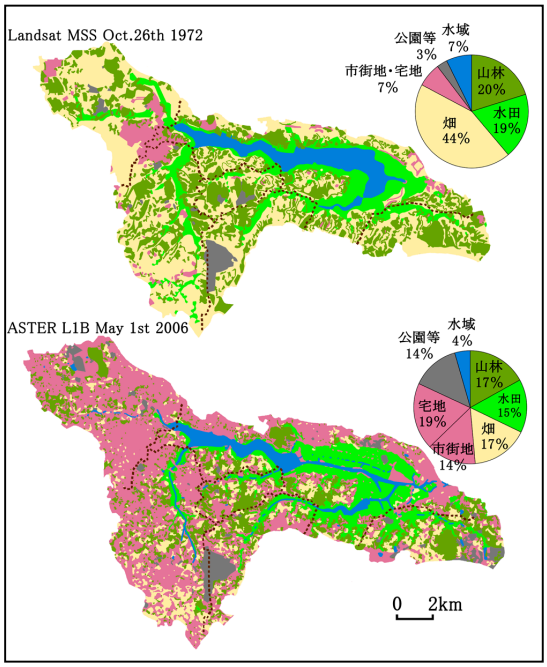

Photo 2 Time-series land-use change derived from two different type of Satellite data.

４）SS のついては、画像より 1972 年から 1997 年、さらに 2006 年から 2007 年に至るまでの変化パターンが Chl.-a の分布と類似していることが判読できる。これより、この手賀沼における SS 変化特性は、大気や河川から混入する土砂汚濁の無機物（砂、シルト、粘土、水酸化物）の影響よりも、有機物，特に Chl.-a の影響を大きく受けていること明らかとなった。

５）COD は有機物等汚染源となる物質を通常，過マンガン酸カリウム等の酸化剤で酸化するときに消費される酸素量のことであり，この汚染源は工場排水，生活排水に含まれている有機物汚染が多くを占めている。画像から、基本的に Chl-a ならびに SS 評価画像と似た分布／変化パターンを示していることからも、同じく Chl-a を主とした有機物に大きく起因していることがわかる。前述のとおり水質項目は密接に互いに依存していることが見て取れる．

4. Discussion

成果として、汚濁水が示すスペクトルレスポンスパターンの違いを利用して、Chl.-a を基本とした富栄養時系列的変化を評価できることが確認できた。2000 年以降、手賀沼においては法律の制定に加え、自治体活動として周辺住民の環境保全に対する意識が向上してきたこともあるが、同水域の水環境の最適化のために同年に設置された「北千葉導水路」の作用が、さらに水質改善に寄与してきた様子が伺える。

しかし、手賀沼は水の流動が鈍い半閉鎖性水域ということもあり、未だ富栄養化状態であるのが現状で、衛星データを利用した継続的なモニタリングが必要である。

<<References>>

1）岡見等，「霞ヶ浦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. 22-31, 1992

2) Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski, Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1-20, 1997.

3) Bricaud, A., M. Babin, A. Morel, and H. Claustre, Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization, *J. Geophys. Res. 100*: 13,321-13,332, 1995.

4) Gordon, H.R., and A. Morel, Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review, Springer-Verlag, New York, 1983.

5) Smith, R.C., and K.S. Baker, Optical properties of the clearest natural waters (200-800nm), *Appl. Opt.*, 61 *20*, 177-184, 1981.

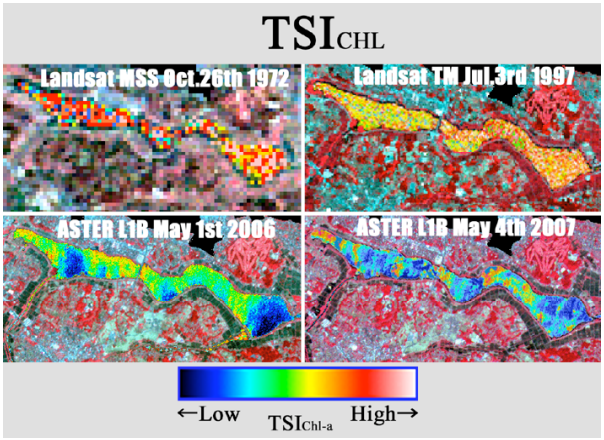

Photo 3　Time-series TSICHL-a change derived from well-converted satellite data through 35 years. (Filament-shaped aided data +original sets)

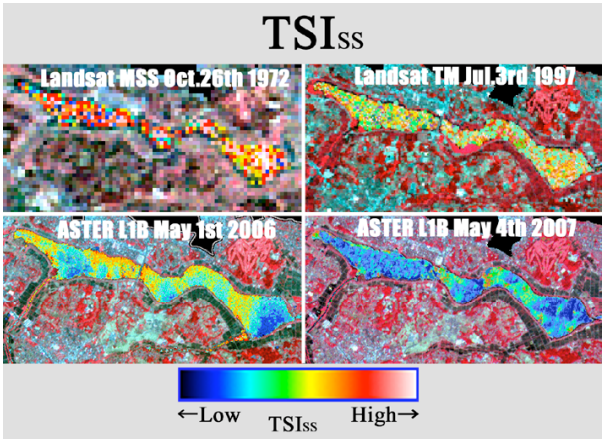

Photo 4　Time-series TSISS change derived from well-converted satellite data through 35 years. (Filament-shaped aided data +original sets)

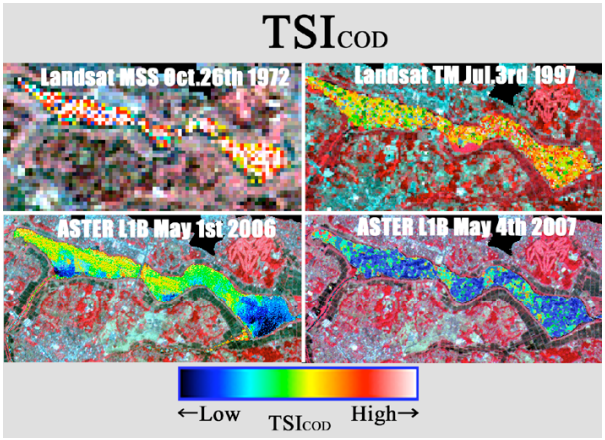

Photo 5　Time-series TSICOD change derived from well-converted satellite data through 35 years. (Filament-shaped aided data +original sets)