

衛星画像による湖水の水質計測に関する研究

A Study on Water Quality Measurement in Lakes by Satellite Image

萩原 圭一*・小泉 俊雄**

By Keiichi Hagihara* and Toshio Koizumi**

Abstract: In this study, correlation between satellite image (LANDSAT/TM, ETM) and water quality in lakes was analyzed, and the practical use in water quality monitoring for environmental assessment was investigated. It showed that 1) the correlation changed depending on the measurement day and the water range, 2) use of spectral ratio of band 3 (red-visible range) to band 4 (near-infrared range) improves the correlation, however, the correlation sometimes might be poorer compared to that of mono-wave lengths, and 3) the correlation between whole nitrogen or whole phosphorous and the spectral ratio of band 3 to band 4 resulted to be more than 0.75 as an average value. These water quality indicator items were found to be more precisely measurable by the satellite image. It can be concluded that this study contributed to the progress of studies on water quality measurement by satellite image.

Keyword: water quality measurement, water quality evaluation, correlation analysis, T-P, T-N

1. はじめに

水に依存することの多い我が国にとって水質汚濁の進行は、深刻な社会問題となっている。なかでも閉鎖性水域における富栄養化現象は、水中の動植物プランクトンの生産を著しく高め、海域では赤潮、湖沼ではアオコの大量発生を引き起こし、生活環境に大きな影響を与えている。各公共団体では、公共用水域水質測定による定期監視やリアルタイム測定設備による常時監視によって水質をモニタリングしている。また、大規模事業施設等から発生する汚水放流については、事業者において水質排出量の監視や環境アセスメントを実施して、放流先水域の水質汚濁防止に取り組んでいる。従来、水域の水質濃度の計測、及び評価は、サンプリングデータを採取・分析して実施されてきたが、面的な拡がりをもつ水域では評価実現性が低く、これまでにリモートセンシングによる水質濃度計測の研究^{1)~15)}が行われてきた。

リモートセンシングによる水質濃度計測のアルゴリズムは、物理的な解析¹⁵⁾と統計的な解析^{1)~14)}に分けられるが、前者は、水中の光学的特性を予め把握しておかなければならないことや複雑な解析を有するために、通常は、上空で観測された水面の分光放射輝度と水質濃度の関係を定式化し推定する後者の方法が広く用いられる。

岡見ら¹⁾は、霞ヶ浦で実測した分光反射率とクロロフィル a、懸濁物質濃度、及び透明度の相関解析を行った。各水質は 720nm 付近の単波長、442nm と 694nm との波長間比で良い結果を示した。同時に、水面反射光が解析結果に及ぼす影響を示唆した。安岡らは、霞ヶ浦のクロロフィル a を分光反射率の実測データから推定するため、クベルカームンク理論を応用し推定モデル⁷⁾を構成した。また、航空機や人工衛星の分光反射

* 開発虎ノ門コンサルタント株式会社

Kaihatsutoranomom Consultant CO., LTD.

** 千葉工業大学工学部建築都市環境学科

Department of Architecture and Civil Engineering,
Chiba Institute of Technology

率を用いてクロロフィル a と懸濁物質の広域推定手法へ研究^{2)、3)、9)}を展開した。航空機や人工衛星によるリモートセンシングデータには、水面反射光や大気の影響が極めて強いため、水面分光放射輝度の測定により補正する必要があること、また、可視赤色域と近赤外域の波長との比を用いれば、水面反射光や大気の影響はある程度緩和されることを示した。

一方で、衛星リモートセンシングデータ（以後、「衛星データ」と称す）の利用は、霞ヶ浦以外の水域でも研究が展開されてきた。水尾ら⁵⁾は、東京湾におけるクロロフィル a の濃度分布の推定に LANDSAT/TM の中赤外域波長の利用可能性を示した。Lavery et al.⁶⁾は、汽水湖で可視緑色域と可視赤色域の波長との比を使ったアルゴリズムが有効であったと報告している。音羽ら¹⁰⁾は同じく LANDSAT/TM を用いて奥多摩湖で相関解析した結果、クロロフィル a、水素イオン、及び透明度で良い結果を示したと報告している。

また、LANDSAT/TM 以外の衛星データを用いた研究では、作野ら^{8)、11)}が汽水湖の宍道湖でクロロフィル a の濃度分布を SPOT/HRV を用いて推定モデルを検討した。その結果、Lavery et al. と同様に可視緑色域と可視赤色域の波長との比を使ったアルゴリズムが有効であることを示した。このアルゴリズムでは、水面反射光をノイズとして扱ったが、大気の影響（パサラディアンス）について水面分光放射輝度の測定を必要としない簡便な補正方法が提案された。

このように、衛星データによる水質濃度計測の知見が数多く集積されてきた。今後は、環境アセスメントや水質監視などの実務への利用を目的とした応用研究が必要である。本論文は、湖沼を対象に既往研究成果を踏まえて衛星データと水質データとの相関解析を行い、水質濃度計測が可能な水質項目と、その計測精度を確認し、環境アセスメントや水質監視などの実務への利用性について探ったものである。

2. 対象水域の概要

研究の対象湖沼は、日本の湖沼の中でも富栄養化現象が顕著である霞ヶ浦と印旛沼、そして比較的水質が良好な高滝ダムを選定した。以下に対象水域の概要を示す。

(1) 霞ヶ浦

霞ヶ浦は、湖容積 870 百万 m³、年間流入量 140 億 m³、湖面積 220km²、流域面積 2、150km²、茨城県、栃木県、及び千葉県にまたがる琵琶湖に次ぐ日本第 2 位の大きな湖である。平均滞留日数は 200 日と長く海拔 16cm の低地に位置し、平均水深 4m、最大水深でも 7m 程度と水深の浅い平坦な湖で淡水の富栄養化しやすい湖である。流域は、農業及び工業用水等として利用され、つくば市や土浦市等では水道水源として重要な役割を有しているが、毎年夏季にアオコが異常発生し上水の異臭味の発生、濾過障害など多くの水質問題を抱えている。昭和 57 年に水質浄化を目指す霞ヶ浦富栄養化防止条例が施行され、昭和 59 年に湖沼水質保全特別措置法の指定湖になり、環境基本法に基づく環境基準は湖沼 A と湖沼 III 類型に指定されている。

(2) 印旛沼

印旛沼は、湖容積 28 百万 m³、湖面積 12km²、流域面積 487km²、利根川下流右岸と下総台地の中央に位置する千葉県内最大の湖沼である。平均水深 1.7m、最大水深でも 2.5m 程度であるが、琵琶湖、霞ヶ浦に次いで日本第 3 位の流域人口が多く、霞ヶ浦と同様に淡水の富栄養化しやすい湖である。流域は、農業及び工業用水等に利用されている。水質は、1960 年代以降、流域人口の増加に伴い悪化し、全国有数のレベルになった。環境基本法に基づく環境基準は湖沼 A と湖沼 III 類型に指定されているが、平成 6 年に化学的酸素要求量の年平均は過去最悪同値 (13mg/l) を記録し、現在も環境基準は達成していない。

(3) 高滝ダム

高滝ダムは、湖面積 2km²、流域面積 107km²、平均水深 7.2m、最大水深 14.3m、千葉県市原市に位置す

る。房総半島中央部に貫流する養老川の治水対策、上水道、及び農業用水の水源として計画されたダム湖であり、水質汚濁が懸念され環境基本法に基づく環境基準は湖沼A類型に指定されているが、化学的酸素要求量は環境基準を達成していない。

3. 解析方法

図1に解析手順を示す。本研究で使用した衛星データは、LANDSAT 5号 TM/7号 ETM データである。衛星データの前処理として『国土地理院発行 数値地図 25000 (空間データ基盤) 茨城県、千葉県』をリファレンスデータとし、幾何学的歪みの補正と緯度経度座標を与えた。衛星データと水質データとのデータセットは、衛星データと観測と同期して測定された水質データのうち表1に示す4時期である。また、霞ヶ浦の水質データは、国立環境研究所の「霞ヶ浦データベース」¹⁷⁾における実測データを用いた。印旛沼及び高滝ダムの水質データは千葉県の「公共用水域水質測定結果」¹⁸⁾の実測データを用いた。水質項目は、湖沼の環境基準で定められている懸濁物質質量 (SS)、化学的酸素要求量 (COD)、全窒素 (T-N)、全リン (T-P)、クロロフィル a (chl-a) 及び透明度 (Trans) とした。水質測定地点におけるデジタル値 (衛星が観測した分光放射輝度に相当する値で以後、「DN」と称す) は、水質測定地点の緯度経度座標を中心とした90m×90m (3×3ドット) の範囲の平均値を抽出して、水質データと相関解析を行った。表2及び図2に水質測定位置及び地点を示す。

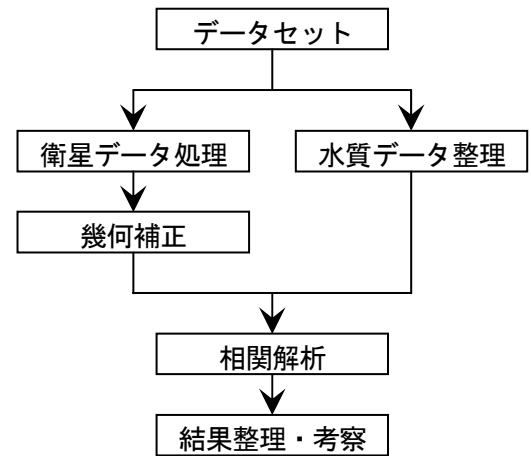


図1 解析手順

図1に解析手順を示す。本研究で使用した衛星データは、LANDSAT 5号 TM/7号 ETM データである。衛星データの前処理として『国土地理院発行 数値地図 25000 (空間データ基盤) 茨城県、千葉県』をリファレンスデータとし、幾何学的歪みの補正と緯度経度座標を与えた。衛星データと水質データとのデータセットは、衛星データと観測と同期して測定された水質データのうち表1に示す4時期である。また、霞ヶ浦の水質データは、国立環境研究所の「霞ヶ浦データベース」¹⁷⁾における実測データを用いた。印旛沼及び高滝ダムの水質データは千葉県の「公共用水域水質測定結果」¹⁸⁾の実測データを用いた。水質項目は、湖沼の環境基準で定められている懸濁物質質量 (SS)、化学的酸素要求量 (COD)、全窒素 (T-N)、全リン (T-P)、クロロフィル a (chl-a) 及び透明度 (Trans) とした。水質測定地点におけるデジタル値 (衛星が観測した分光放射輝度に相当する値で以後、「DN」と称す) は、水質測定地点の緯度経度座標を中心とした90m×90m (3×3ドット) の範囲の平均値を抽出して、水質データと相関解析を行った。表2及び図2に水質測定位置及び地点を示す。

表1 データセット

年月日	衛星データ		水質データ		
	観測時間	シーン雲量	対象湖沼	測定時間	地点数
1986/10/9	9:35	20	霞ヶ浦	9:00~10:00	10
1989/5/10	9:44	10	霞ヶ浦	9:00~10:00	10
1990/4/11	9:35	0	霞ヶ浦	9:00~10:00	10
2001/6/4	10:03	0	印旛沼, 高滝ダム	9:13~10:26	6

表2 水質測定地点

水域	地点	緯度経度	
		北緯	東経
霞ヶ浦	St.1	36° 08' 57.1	140° 19' 29.5
	St.2	36° 08' 15.7	140° 20' 25.3
	St.3	36° 07' 18.1	140° 22' 39.1
	St.4	36° 05' 21.1	140° 23' 53.5
	St.5	36° 04' 54.7	140° 13' 13.4
	St.6	36° 03' 54.1	140° 13' 59.6
	St.7	36° 02' 43.3	140° 17' 58.3
	St.8	36° 02' 08.5	140° 24' 13.3
	St.9	36° 00' 30.2	140° 26' 09.1
	St.10	35° 58' 35.6	140° 28' 19.9
印旛沼	St.1	35° 44' 52.0	140° 11' 36.0
	St.2	35° 45' 59.0	140° 12' 31.0
	St.3	35° 48' 01.0	140° 15' 07.0
高滝ダム	St.4	35° 21' 08.0	140° 09' 35.0
	St.5	35° 21' 30.0	140° 09' 21.0
	St.6	35° 21' 19.0	140° 08' 48.0



図2 (1) 水質測定地点 (霞ヶ浦)

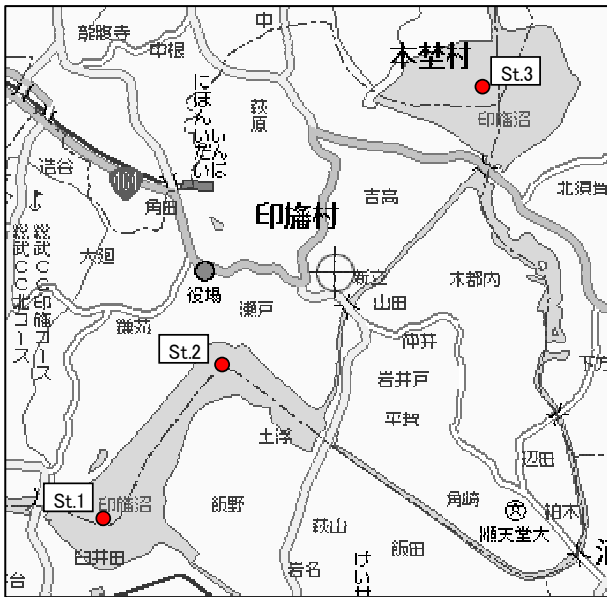


図 2 (2) 水質測定地点 (印旛沼)



図 2 (3) 水質測定地点 (高滝ダム)

4. 相関解析

解析する水質項目は、上述したように懸濁物質量、化学的酸素要求量、全窒素、全リン、クロロフィル a 及び透明度の 6 項目である。DN については、band1~5、7 の各単波長と、既往研究で提案された可視赤色域と近赤外域の波長間比である $(band4-band3)/(band4+band3)$ と $band4/bnad3$ のアルゴリズムを採用し、その実務への利用性を検討した。

衛星データには、水面反射光や大気の影響が極めて強いため、水質濃度を計測するためには水面分光放射輝度の測定などにより DN を補正する必要があるが、これには多大な労力と費用が掛かる。また、パズラディアンズなどのオフセット成分の補正は、放射伝達シミュレーションプログラム 6S¹⁶⁾ を用いるなどの方法で補正することができるが、観測時における大気状態の詳細が把握しにくいいため、個々の衛星データに適合したパラメータの値を求めることが難しい。既往研究で提案された可視赤色域と近赤外域の波長間比のアルゴリズムは、このような水面反射光や大気の影響をある程度緩和することができるものである。

水質項目 (Wq) と衛星データ値及び演算値 (DN) との関係式は、既往研究によって一次回帰式で広く定式化されてきた。一次回帰式で定式化できる物理的な根拠はこれまでに明瞭化されていないが、水面直上の分光放射輝度と水面直下の水質は一次回帰式で表わせることが地上実測^{1)~3), 7)~9)} によって分かっているので、本研究では水質項目と衛星データ値及び演算値との関係は次式の一次回帰式で表わせると仮定した。a、b は定数である。

$$Wq = a \cdot DN + b \dots\dots\dots (1)$$

表 3 は、岡見ら¹⁾ が行った水面の分光放射輝度と水質濃度との相関解析の結果を示したもので、可視域と近赤外域の波長間比を用いることによって、各単波長より良い精度で水質濃度を推定できることが分かる。

表3 岡見ら¹⁾による水面の分光放射輝度と水質濃度との相関解析結果

単位：μm

水質項目	442	570	656	694	694	
					442	(694-442) (694+442)
SS	-0.076	0.388	0.290	0.577	0.892	-
chl-a	-0.201	0.314	0.134	0.480	0.896	0.851

※1: は負の相関を示す。

※2: 調査日：1980/8/12、13

5. 解析結果

表4に相関係数を示し、図3に波長間比 (band4-band3)/(band4+band3) の相関解析図を示す。

霞ヶ浦を対象とした1986/10/9、1989/5/10及び1990/4/11では、DNの波長帯によって各水質項目で正負の相関が混在する。印旛沼と高滝ダムを対象とした2001/6/4では、相関係数が透明度を除き負の相関を示している。また、全般的に波長間比を用いたケースで良い相関関係を示すが、1989/5/10の懸濁物質量では相関係数が0.1を下回り逆に低くなった。

全窒素と全リンについては、波長間比との相関係数がすべての調査日の平均で0.75以上あり、今回の解析でこれらの水質項目も衛星データによって推定できる可能性の高いことが分かった。

化学的酸素要求量は物質量を表したものでないためか、今回の解析では他に比べて良くない結果であった。

透明度は一般に、懸濁物質量、クロロフィルa及びリンなどの濁質の増減に伴って変化する傾向にあるので、このいずれかの水質項目と類似する結果を示すことが多い。今回の解析では、懸濁物質量と類似した傾向を示しており、1985/5/10の波長間比による相関係数は0.2を下回り逆に単波長に比べて低い結果となった。

表4 相 関 係 数

水質項目	調査日	band1	band2	band3	band4	band5	band7	(band4-band3) (band4+band3)	band4 band3
SS	1986/10/9	0.3726	0.7371	0.5523	0.6859	0.0616	0.1404	-0.6934	0.6909
	1989/5/10	0.6381	0.7451	0.7373	0.5345	0.4792	0.4825	-0.0592	0.0520
	1990/4/11	-0.2678	-0.3596	-0.1183	0.4422	0.2238	-0.1676	-0.7502	0.7640
	2001/6/4	-0.9437	-0.9496	-0.6816	-0.8198	-0.8483	-0.9153	0.8511	-0.8414
chl-a	1986/10/9	-0.2846	-0.0047	-0.1939	0.2040	-0.2557	-0.3056	-0.4544	0.4534
	1989/5/10	0.0632	0.0557	0.1010	0.2528	0.2676	0.2339	-0.4402	0.4360
	1990/4/11	-0.5227	-0.6151	-0.4117	0.2015	0.0100	-0.3265	-0.6728	0.6859
	2001/6/4	-0.9499	-0.9354	-0.7836	-0.8656	-0.8821	-0.9199	0.8761	-0.8654
T-N	1986/10/9	0.2195	0.1741	0.2289	0.6851	0.1900	0.1204	-0.7614	0.7565
	1989/5/10	0.6629	0.5998	0.7003	0.8759	0.8919	0.9144	-0.8388	0.8429
	1990/4/11	0.0424	0.0632	0.2941	0.5898	0.6377	0.1758	-0.7268	0.7351
	2001/6/4	-0.9432	-0.9398	-0.9354	-0.9657	-0.9624	-0.9615	0.9495	-0.9407
T-P	1986/10/9	0.1349	0.3330	0.2347	0.5074	-0.1025	-0.0436	-0.6445	0.6327
	1989/5/10	0.6026	0.5870	0.6855	0.8039	0.7645	0.8018	-0.7251	0.7248
	1990/4/11	-0.2010	-0.3114	-0.0592	0.4915	0.3357	-0.0458	-0.7734	0.7845
	2001/6/4	-0.8059	-0.8073	-0.6855	-0.5451	-0.5916	-0.7043	0.6021	-0.5905
COD	1986/10/9	0.1217	0.1957	0.2445	0.5001	0.0200	-0.1292	-0.5887	0.5771
	1989/5/10	-0.0089	0.0200	-0.0100	-0.0283	-0.0707	-0.1338	-0.0173	0.0071
	1990/4/11	-0.6135	-0.7014	-0.4612	0.1549	0.0640	-0.3397	-0.5133	0.5250
	2001/6/4	-0.4217	-0.4022	-0.4975	-0.6299	-0.6446	-0.6007	0.6471	-0.6531
Trans	1986/10/9	-0.5491	-0.7224	-0.7594	-0.8459	-0.5363	-0.5361	0.7975	-0.7964
	1989/5/10	-0.7381	-0.8187	-0.8116	-0.6335	-0.5784	-0.5660	0.1652	-0.1575
	1990/4/11	0.0173	0.1568	-0.1118	-0.4194	-0.1187	0.2415	0.5025	-0.5100
	2001/6/4	0.8989	0.8485	0.9061	0.9087	0.8877	0.8797	-0.8893	0.8783

※ は負の相関を示す。

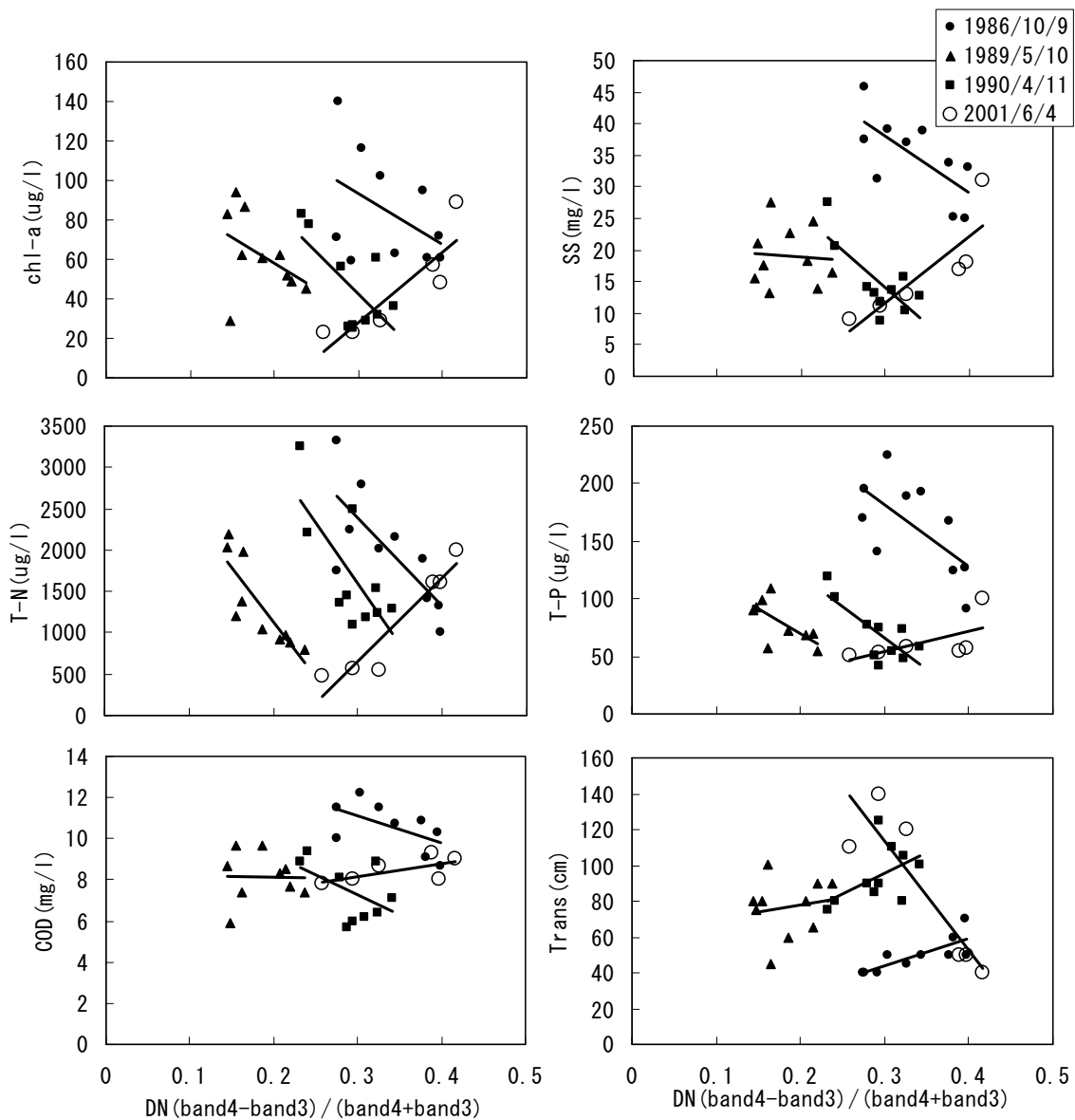


図3 相関解析図（波長間比）

6. 結論

本論文では、衛星データによる水質濃度計測技術を環境アセスメントや水質監視などの実務への利用するために、既往研究成果を踏まえて、霞ヶ浦、印旛沼及び高滝ダムを対象に衛星データと水質データとの相関解析を行った。その結果、現段階では以下のような結論を得た。

- ① 全般的に相関関係は、観測日や水域が異なると相関精度が変化し、正負が逆転する関係を示す場合があることが分かった。これは、水域に潜在する水質組成因子^{1,2)}の影響、水面反射光及び大気の影響が、衛星データに対して水域及び観測日ごとに異なった量でノイズとして加わり、本来衛星データで得られるはずの水質情報を変化させたと考える。
- ② 既往研究の知見と同様に波長間比を用いることによって水面反射光や大気の影響が低減され相関関係は良くなる傾向を示す。しかし、波長間比を用いても単波長より相関が低くなる場合がある。
- ③ 全窒素及び全リンは波長間比との相関係数がすべての調査日の平均で0.75以上あった。今回の解析でその因果関係を明瞭化することはできなかったが、これらの水質項目も衛星データで推定できる可能性の高いことが分かった。

7. おわりに

(1) まとめ

従来から環境アセスメントや水質監視などの実務へ衛星データの利用が注目されているが、衛星データと水質データとのデータセットの取得が難しいという現実問題があり、衛星データをこのような実務に利用されているとは言いがたい状況である。しかし、これまでに既往研究で計測アルゴリズムの有効性が数多く報告されてきた。そこで本研究では、衛星データと水質データとのデータセットの取得ができることを前提とし、既往研究で提案されているアルゴリズムで水質濃度計測が可能な水質項目とその計測精度を確認し、環境アセスメントや水質監視などの実務への利用性について探った。その結果、波長間比を利用することによって、水面反射光や大気の影響が低減され計測精度は大きく向上する傾向にあるが、観測日や水域が異なると正負が逆転する相関を示すこと、また、場合によっては単波長より相関が低くなることが分かった。この結果を踏まえると、このアルゴリズムを実務に用いるためには、衛星データのスペクトル特性を踏まえて取り扱える水質項目などを整理しておくことが必要であると考えられる。

全窒素と全リンは、波長間比との相関がすべての調査日の平均で 0.75 以上あり、これらの水質項目も高精度で推定できる可能性が高い。このことを示唆できたことは本研究の大きな成果である。全窒素と全リンは富栄養化現象を捉える指標の中でも重要な栄養物質で環境基準でも定められている。これらの2つの物質がどのように富栄養化にかかわるかは、それぞれの水域のもつ特性（組成因子）によって異なる。一般に空気中の窒素を固定する栄養生物（藻類）が水域に増加すると、水中の窒素量に変化が見られにくくなる。その場合はリンが栄養生物に吸収されその生産に深くかかわりを示し富栄養化指標となる。また、リンの増加は藻類（chl-a）の生産に付与して透明度が下がることが分かっている。このように窒素とリンは富栄養化現象に密着な関係を持ち、環境基準もありながら、既往研究でこの2つの水質項目を取り上げたものは少ない。したがって、全窒素と全リンについても取り上げて今後研究を展開していく予定である。

一方で、今回の解析で使用した波長間比よりも水質濃度が精度よく計測できること、観測日や水域によって計測精度が偏らないアルゴリズムについても検討を加える必要があると考える。富栄養化しやすい湖沼において、古くから富栄養化指標である TSI (Trophic Status Index)¹⁹⁾ が構成されている。この TSI の基本形は藻類量をクロロフィル a で表現した場合に透明度を代表パラメータとして富栄養化の度合いを定式化したものである。また、透明度とクロロフィル a は全リンとも良い相関を示す傾向にあり、これらの複数の因子から湖沼の水質状況を把握する TSI も提案されているので、単純に衛星データの比演算処理だけでなく、透明度やクロロフィル a などの変化量をパラメータとしたアルゴリズムの検討も有用であると考えられる。

加えて、湖沼は閉鎖性のため微量でも河川より水質汚濁物質が流入すると、時間とともに沈殿し蓄積され、物質の溶出や巻上がりがおきる。また、汚染の要因は、人為的要因より自然的なものが水質環境に大きく影響を与え、特に降雨時には森林の地表面や土壌表層からの流出が洪水流に含まれて直接的に湖沼へ流入し水質に大きな影響を与えるから、湖沼の水質計測と評価は、湖沼へ流入する河川の水質状況や降雨の影響に留意して行う必要があると考える。

(2) 今後の課題

今後の研究課題を以下に示す。

- ①波長間比で水質濃度計測が可能な条件を整理する。
- ②波長間比による水質分布が実体を正しく表わしているか、水質濃度分布画像を作成し面的検証を行い、環境基準との比較などにより水質評価を行う。そして、水質の環境評価に対して衛星データの活用方法について提案する。

参考文献

- 1) 岡見登, 岸野元彰, 宮崎忠国: 霞ヶ浦湖水の分光反射分光反射率と水質, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 21-31, 1982.
- 2) 安岡善文, 宮崎忠国: リモートセンシングによる湖水域の水質分布計測—回帰分析を用いた大気補正と水質推定—, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 51-62, 1982.
- 3) 安岡善文, 宮崎忠国: 遠隔計測による水質の定量, 国立公害研究所研究報告 77, pp. 165-185, 1985.
- 4) 田中修三, 比企三蔵, 小西浩之: Landsat の捉えた霞ヶ浦のアオコの拡がりと吹送流, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 25-35, 1990.
- 5) 水尾寛己, 二宮勝幸, 零石雅美, 多賀保志, 安岡善文: TM データによる東京湾のクロロフィル a 量の観測の検討—中間赤外域における水質情報抽出可能性—, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 135-139, 1991.
- 6) Lavery, P., Pattiaratchi, C., Wyllie, A., and Hick, P.: Water quality monitoring in estuarine waters using the Landsat thematic mapper. *Remote Sensing Environ.*, 46, 268-280, 1993.
- 7) 沖一雄, 安岡善文: 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, 1996.
- 8) 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, Vol. 19, No. 2, pp. 20-36, 1999.
- 9) 沖一雄, 安岡善文, 田村正行: 高濃度水域における水質リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 21, No. 5, pp. 449-457, 2001.
- 10) 音羽一弘, 齋藤恵介, 森山萌, 小川進: Landsat TM による奥多摩湖の水質モニタリング, 日本リモートセンシング学会第 30 回学術講演会論文集, A1, pp. 3-4, 2001.
- 11) 作野裕司, 松永恒雄, 六川修一, 高安克己, 國井秀伸, 中村幹雄: 多時期 SPOT/HRV データによる宍道湖表層の総一次生産量モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 21, No. 2, pp. 141-149, 2001.
- 12) 牧雅康, 沖一雄, 椿広計, 安岡善文: 潜在要因の影響を考慮した水質計測の因果モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 24, No. 2, pp. 153-162, 2004.
- 13) H. H. Kim, C. R. McClaim, L. R. Blaine, N. D. Hart, L. P. Atkinson and J. A. Yodar: Ocean chlorophyll studies from a U-2 aircraft platform, NASA Technical Memorandum 80574, 1-27, 1979.
- 14) D. K. Clark, E. T. Baker and A. E. Strong: Upwelled spectral radiance distribution in relation to particulate matter in sea water, *Boundary-Layer Meteorology*, 18, 287-298, 1980.
- 15) 宮崎早苗, 灘岡和夫: 光学理論に基づく海域内複数物質濃度の逆推定法, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 50-63, 1999.
- 16) E. Vermote et al.: Second Simulation of the Satellite Signal in Solar Spectrum (6S), 6S User Guide Version 2, 1997.
- 17) 独立行政法人 国立環境研究所ホームページ, “水・土壌 | 霞ヶ浦データベース”
<http://www-cger2.nies.go.jp/gems/database/kasumi/index.html> (accessed 1 Mar. 2006)
- 18) 千葉県ホームページ, “水質 | 公共用水域及び地下水の水質の状況 | 公共用水域地点別水質測定結果データベース | 公共用水域水質測定地点一覧 (湖沼)”
http://www.pref.chiba.jp/syozoku/e_suiho/3_kansi/3_lake.html (accessed 1 Mar. 2006)
- 19) 合田健: 水環境指標, 株式会社思考社, 1979.