特集 / リモートセンシング技術の環境監視への応用

リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用

Application of Remote Sensing to Monitoring Lake Environment

安 岡 善 文*

1. はじめに

日本における天然湖沼の数は、面積が1 ha 以上のもので約 470 といわれる。これらの湖沼の多くが、周辺地域における都市化、工業化などの影響を受け、水質環境の悪化という問題を抱えている。なかでも近年大きな問題となっているのは富栄養化現象であろう。富栄養化は、水中における窒素、リンなどの有機栄養塩類の蓄積が原因となっており、藻類など動植物プランクトンの異常発生を引き起すもので、海域における赤潮、湖沼におけるアオコとして知られている。

水質環境の現況を有機汚濁の指標の1つであるCODについてみてみると、環境基準を達成している湖沼は全体の約4割(昭和54年)にすぎない。¹⁾ 特に、琵琶湖、霞ヶ浦、諏訪湖などの周辺に都市、農業地帯を有する湖沼では、生活排水、農業排水などのために富栄養化の進行が著しく、夏季においては、藻類が水面に緑色のペンを流したような状況を呈することもあり、漁業、景観などの生活環境に深刻な影響を及ぼしている。

これら水質環境の悪化を防止し、水質浄化を行っていくためには、湖沼における水質の現況および変化を正確に把握することが不可欠である。しかしながら広い水域の環境状態を監視することは容易ではない。特に富栄養化現象では、プランクトンの発生が場所によって群(パッチ)を形成するなど、その空間分布が問題となるため、従来から行われている湖上での採水、分析といった方法のみでは、状況を迅速かつ的確に把握することは困難であろう。

航空機、人工衛星などを利用したリモートセンシングは、広い範囲を同時に観測することを可能にするため、広域環境監視への利用が期待されている。実際リモートセンシングにより得られる映像データは、従

来の離散的な測定点における観測データに比較し、多大な情報を我々に提供してくれる。しかしながら一方では、測定項目の多様性、測定の定量性などの点で、まだ未解決な問題も多い。本稿では、湖沼の環境監視特に水質計測におけるリモートセンシングの利用について、その手法、可能性および問題点を検討する。

2. 水質と分光特性

すべての物質は、それぞれ固有の仕方で電磁波を反射、吸収、透過および放射する。植物の葉が緑色に見えるのはその一例で、これは葉中のクロロフィルが太陽光のうち緑色の波長の光をより強く反射するためである。電磁波に対するこの物質固有の波長特性を分光

図-1 水質リモートセンシングの概略図

* 国立公害研究所環境情報部情報システム室主任研究員 Yoshifumi YASUOKA
The National Institute for Environmental Studies, Environmental Information Division,
Information Systems Section, Senior Research Scientist.

(a) SSの多い水域における分光特性

(b) 藻類の多い水域における分光特性

図-2 湖水面における分光特性

特性またはスペクトル特性という。リモートセンシングは、対象の分光特性を計測することにより対象の物質およびその状態を推定する技術であるといえる。

水域におけるリモートセンシングの概略図を図-1に示した。水中に入った太陽光は、水中の物質および水自身によって吸収、散乱、透過および反射される。それらの特性（分光特性）は物質によって異なるから、水中に入って再び水面に出てきた光は、水中の物質に関する情報を含むと考えられる。すなわち、水質のリモートセンシングでは、水の分光特性を計測することにより、水質を推定する。

水の分光特性の例を図-2に示す。図-2(a), (b)はともに茨城県霞ヶ浦において測定された湖水の分光特性で、(a)は河口部の土砂を中心としたSS（浮遊懸濁質）の多い水域で、(b)は藻類（アオコ）の多い水域で得られたものである。(a)に示される分光特性は、波長の増加とともに光の輝度が単調に増加しているが、(b)では異った波長特性を示している。図-2(b)の分光特性における670～680nm近傍での輝度の減少および690nm以上での急激な立上りは、それぞれ、藻類中に含まれるクロロフィルの吸収帯および蛍光帯に対応する特性を示すもので、クロロフィルの存在を明示している。

図-2の例に示されるように、分光特性は水中の物質の組成、量を反映しており、水面上での水の分光特性を計測することにより、水質を推定することが期待される。しかしながら、航空機、人工衛星を利用した実際のリモートセンシングでは、水中からの光の他に、

水面からの反射光、大気中の粒子からの散乱光などが雑音として加わるため（図-1）、水質の定量は必ずしも容易でない。特に、人工衛星など高高度からのリモートセンシングでは、大気散乱光による影響が大きく、センサに検知される全光エネルギーの80%以上を占めると推定される。このためリモートセンシングを利用した水質の定量では、大気散乱光、水面反射光による影響の除去が重要な課題となっている。

3. リモートセンサー

リモートセンシングでは対象の状態を推定するために、対象の分光特性の違いを検出しなければならない。このために通常、電磁波の波長帯をいくつかに分割して、各波長帯域ごとのエネルギーを検知する多重分光装置（マルチスペクトルセンサ）が用いられる。図-3に電磁波のスペクトルと、水質計測に利用されるリモートセンサの波長帯域を示した。なおリモートセンサの詳細については参考文献^{2),3)}を参照されたい。

人間の目は電磁波のうち可視域（0.4～0.7μm）と呼ばれる一部分しか感じるができない。しかしながら、自然界には、波長の非常に短い電磁波（γ線）から非常に長い電磁波（ラジオ波）までが存在しており、リモートセンシングではこれらのいろいろな波長帯域に感ずるセンサを利用することにより、人間の目に感ずることのできない現象をも観測することができる。例えば図-2に示した湖水の分光特性では、人間の目が感ずることができるのは0.4～0.7μmのみで、ク

図-3 電磁波のスペクトルとセンサー

(a) 0.499 ~ 0.519 μm

(b) 0.723 ~ 0.740 μm

図-4 航空機搭載マルチスペクトルスキャナによる映像データ

クロフィルの特徴的な性質の1つである近赤外（0.7 μm 以上）での特性は、リモートセンサを用いてはじめて検知することができる。

すなわち水質のリモートセンシングでは、対象とする物質の分光特性に対応した波長帯域を選択することが重要である。図-4に航空機に搭載されたマルチスペクトルスキャナ(MSS)から撮影された映像データの一例を示す。データは霞ヶ浦において高度2000 mで得られたものである。図-4(a)に示された波長帯域が0.499 ~ 0.519 μm の映像では、土砂などのSSを多く含む河川からの流出水が明示されており、一方(b)の0.723 ~ 0.740 μm における映像では、アオコ(藻類)が鮮明に示されている。

リモートセンシングでは、太陽光の反射光を利用する受動型の方式と同時に、計測システム自身が電磁波を放射し、その反射光を受信する能動型の方式も利用される。水域への応用では、放射される電磁波として通常、マイクロ波、レーザー光などが使用される。例えば、合成開口レーダー(SAR)、サイドルッキンググレーダー(SLAR)では、航空機等の飛翔体からマイクロ波を放射し、その反射波を飛翔体に取付けられたアンテナで検知するが、マイクロ波に対する分光特性から、油(流出油など)、塩分濃度、水温の計測に有効といわれている。またレーザー光を利用したクロロフィルの計測も検討されている。これはクロロフィルが特定波長のレーザー光を受けると、波長の異った蛍光を発することを利用して、その濃度を測定しようとするもので蛍光分光方式ともよばれる。

能動方式のリモートセンシングを水質計測に利用する試みは、まだ実験段階のものが多い。しかしながら計測システム自身が電磁波を発するため、天候による影響を受けにくいなどの利点を有する。特にマイクロ波、レーザー光などは大気中の粒子の影響を受けにくく、雲、霧などの天候下でも使用できるため、日本のように快晴日が少く、太陽光を必ずしも利用できないことが多い地域では有効な方法となるであろう。

4. 水質濃度分布の推定

水の分光特性が水中の物質組成、量などの情報を反映することを示した。本節では、航空機、人工衛星に搭載されたリモートセンサにより撮影されたマルチスペクトル画像データから水質分布を推定する方法について述べる。

マルチスペクトルデータから水質を推定する方法は、

大別して物理的方法と統計的方法に分類される。前者では、水中の物質組成、量と分光特性の関係、また大気散乱光、水面反射光などによる影響を物理光学的な理論モデルを用いて記述する。^{4),5)} しかしながら理論モデルでは、モデルに含まれるパラメータの設定が難しい、モデルが複雑になればなる程解くことが難しくなる、などの問題点がある。また水質組成、大気組成が複雑になると、これを理論モデルで記述することは難しい。

一方統計的方法は、リモートセンシングデータと実際に水面上で測定したデータ(グラントルースデータ)を用いて、両者の関係を統計的にモデル化するので、通常重回帰モデルなどが使われる。この方法では、モデルを推定するために常にグラントルースデータを必要とする欠点があるが、処理が簡単である。実験の繰返しによってある程度安定した推定モデルが得られる。などの利点もあり、水質分布図の作成には有効である。ここでは筆者らが霞ヶ浦を対象として、LANDSATデータを用いて行った水質分布の推定について紹介する。⁶⁾ これは霞ヶ浦の湖面上で測定した水質と地球観測衛星LANDSATにより撮影されたマルチスペクトル画像データとの回帰分析により水質推定モデルを構成し、水質分布図を作成したものである。

湖上の測定点*k*における水質(例えばクロロフィル濃度)を y_k 、測定点*k*に対応するLANDSAT画像上の点の濃度を($d_4^k, d_5^k, d_6^k, d_7^k$)^{注1)}とする。ここで添字は波長帯域の番号(バンド)を表わす。各測定点におけるデータセット $\{y_k\}$ および $\{d_i^k\}$ ($i=4, \dots, 7$)を用いて、

$$(i) \quad y = \alpha \cdot d_i + \beta \text{ (単回帰式)}$$

$$(ii) \quad y = \alpha d_i / d_j + \beta$$

$$(iii) \quad y = \sum_i \alpha_i d_i \text{ (重回帰式)}$$

など多数の回帰モデルを構成、水質推定モデルの可能性を検討した。また画像濃度 d_i の代りに d_i から推定される水面分光反射率 R_i と水質との相関についても調べた。

表1に、1981年11月24日および1982年3月3日に得られたデータから計算された水質とLANDSAT画像データとの単相関係数(上記モデルi)を使用)を示す。SSおよび透明度については、ともに良い相関が得られ、水質推定の可能性が示されたが、クロロフィルに

注1) LANDSATは4バンドのマルチスペクトルスキャナ(MSS)を搭載しており、各バンドはそれぞれ4, 5, 6, 7と番号付けられている。

表1 水質とLANDSAT 画像データとの相関係数

水質項目 \ MSS バンド	1981/11/24			1982/3/3		
	4	5	6	4	5	6
透 明 度	-0.81	-0.82	-0.78	-0.96	-0.95	-0.91
SS	0.80	0.79	0.79	0.94	0.97	0.92
クロロフィル -a	-0.67	-0.57	-0.25	-0.30	-0.27	-0.31
測 定 点 数	11			13		

* 表中下線は大検定 (95%) により「相関なし」が棄却されることを示す。

については両日とも良い相関が得られていない。これは、(i) LANDSAT MSS の波長帯域が広く、クロロフィルの吸収帯、蛍光帯といった特徴的な分光特性を検出できない、(ii) LANDSAT MSS のゲインが低く、水質の微少な差を検出できない、などの理由によるものと考えられる。実際、航空機による実験ではクロロフィルとリモートセンシングデータの間に良い相関が得られている。また米人工衛星 NIMBUS-7 に搭載された水質計測用マルチスペクトルスキャナ CZCS (Coastal Zone Color Scanner) では、波長帯域がクロロフィルの吸収帯に合わせられており、やはり良い相関が得られている。

水質 (SS) と LANDSAT MSS データの回帰分析から得られたモデルをもとに推定した霞ヶ浦の SS 分布図を図-5 に示す。図-5(a), (b) はそれぞれ 1981 年 11 月 24 日および 1982 年 3 月 3 日の推定分布図である。両日とも土浦入江 (西部入江) および高浜入江 (北西部

入江) において SS 濃度が高く表示されているが、これは河川からの濁水流入や浚渫工事のため底泥のまき上げが多い場所である。

5. 将来への展望

リモートセンシングによる水域環境計測の現状について概説した。その利点を要約すると以下のようなものが挙げられる。

- (1) 水質を広域的 (二次元的、三次元的) に、かつ同時的に計測することができる。
 - (2) 測定する場所の局所性に影響されやすい従来の採水、分析による手法に比較し、より大局的な計測が可能である。
 - (3) 測定対象と非接触であるため、対象の場を乱さず、測定が安定する。
 - (4) 同一のセンサを用いることにより同じ分解能、精度で測定することができるため、異った水域においても普遍的な測定が可能である。
- しかしながら一方では、つぎのような問題点も指摘されている。

- (i) 現時点で測定可能な項目が、SS、透明度、クロロフィル、油、水温、などに限られており、環境基準に関する水質項目である COD、DO、重金属、PH などは測定困難である。
 - (ii) 測定可能な項目についても、必ずしも環境基準と同程度の精度 (ppb) は得られない。
 - (iii) 太陽光を利用する受動方式では、天候による影響を受けやすく、測定周期が安定しない場合もある。
- 今後、リモートセンシングを湖沼環境監視に実用し

(a) 1981年11月24日

(b) 1982年3月3日

図-5 LANDSAT MSS データより推定された SS 分布図

表2 近い将来測定可能と考えられる水質パラメータと使用されるセンサー

	物理光学特性	生物特性	化学特性	流体特性
水質項目	濁度 SS 油、油膜 波高 表面水温 反射率	クロロフィル 動植物プランクトン 藻類 水生植物 魚群	塩分濃度 放射性廃棄物 重金属 COD 毒物 有機物質	流況特性 湧昇流 物質移流
センサー	可視・赤外 MSS マイクロ波放射計 合成開口レーダー サイドルッキングレーダー レーダー高度計 レーザー蛍光分光計	可視・赤外 MSS マイクロ波放射計 レーザー蛍光分光計 ソナー	可視・赤外 MSS マイクロ波放射計 レーザー蛍光分光計	可視・赤外 MSS マイクロ波放射計 合成開口レーダー サイドルッキングレーダー

ていくためには

(a) 現在測定が困難な水質項目（例えばCOD、PH
など）を測定可能にする新たな技術の開発を行う

（表2）、

(b) リモートセンシングの利点を積極的に活用した新たな環境項目、指標を作成する、

(c) リモートセンシングによる映像データを利用して湖上における水質監視地点の少数化、最適配置を行うなど、現存手法との効率的な併用を図る、

といった多面的な研究推進が必要であろう。特に、従来の手法では把えることが難しい富栄養化の指標など、広域にわたる水域環境の指標化への利用が期待される。

6. ま と め

湖沼における水質環境監視へのリモートセンシングの利用について、現状、問題点および可能性を検討した。リモートセンシングは比較的新しい技術であり、実利用のレベルに到っているものは少い。しかしながら“広い範囲を同時に計測することができる”というこの技術の有する特色が、環境監視に役立つことも事実であろう。実際、現在利用可能な地球観測衛星L A NDSAT-3, 4, NIMBUS-7, NOAA などに加えて、MOS-1（海洋観測衛星、日本）、ERS-1（資源観測衛星、日本）、SPOT（仏）、ERS-1（ヨーロッパ宇宙機構）など、各種の地球観測衛星の打上げが予定されている。今後これらの衛星の利用を含め、リモートセンシングの実利用に向けて研究開発を行うこと

が必要である。

参 考 文 献

- 1) 松村 隆（1982）：わが国の湖沼の水質汚濁の現状と対策。水，vol. 24-2，16-19。
- 2) Manual of Remote Sensing (1975) American Society of Photogrammetry.
- 3) 和達清夫他編著（1976）：リモートセンシング。朝倉書店。
- 4) W.R. Mc Cluney（1976）：Remote measurement of water color, Remote Sensing of Environment, vol. 5, 3-33
- 5) 岡見 登（1977）：海の色のスベクトルについて。沿岸海洋研究ノート，vol. 15-1，56-66。
- 6) 安岡善文・宮崎忠国（1982）：リモートセンシングによる湖水域の水質分布計測。リモートセンシング学会誌，Vol. 2-3，51-62。