

湖沼監視のための衛星画像高解像度化手法の開発

圓佛伊智朗* 相馬憲一* 筒井和雄** 東堂康正^S

* (株) 日立製作所日立研究所 茨城県日立市大みか町7-1-1

** 〃 大みか工場 茨城県日立市大みか町5-2-1

S 〃 機電事業部 東京都千代田区神田駿河台4-6

概要

本発表では、衛星画像を用いた湖沼監視技術について報告する。特に、適用対象を拡大するための高解像度化手法について提案し、その効果を示す。提案手法は、可視光波長を単バンドで計測するパンクロマティック画像が、一般に水質評価に用いられるマルチスペクトル画像と重複する波長を計測している点に着目し、両者の組合せによって解像度を向上させる。SPOT HRV画像を用いた事例として、霞ヶ浦区域に適用し、2倍の空間解像度が得られる目処を得た。

キーワード

湖沼, 水質監視, リモートセンシング, 衛星画像, 高解像度化

1. 緒言

水源として重要な湖沼の水質監視は、従来より行われてきた環境基準点での定期観測などと合わせて、観測衛星による広域同時計測の検討^{1)・2)}が進められている。衛星リモートセンシング技術の導入により、湖沼の水質、アオコ分布を評価するものである。本技術の本格的な普及は、霞ヶ浦などの大規模な水圏だけでなく、ダム湖などへの適用拡大が鍵となる。

規模の小さい湖沼にリモセン技術を適用するためには、高い空間解像度を有する衛星画像が必要である。本研究では、これに対応する技術として、マルチスペクトル画像の解像度を向上させる手法を提案する。また、提案手法の効果を検証する目的で、SPOT HRV画像に高解像度化手法を適用した結果を示す。

2. 衛星画像による湖沼監視

2.1 衛星画像の種類

衛星画像は、地球観測衛星に搭載されたセンサにより、太陽光が地表面または水面で反射した放射輝度を計測したものである。可視～赤外波長域を計測する光学センサによる衛星画像は、図1に示すように、1) パンクロマティック画像と2) マルチスペクトル画像とに分けられる。パンクロマティック画像は、白黒写真と同様に、主に可視波長域を単バンドで計測した画像である。また、マルチスペクトル画像は、可視～赤外波長域を複数の波長帯(バンド)で計測したものである。

水質評価など、分光特性に基づく解析にはマルチスペクトル画像が用いられる。Landsat TMやSPOT HRVでは、マルチスペクトル画像の解像度は20～30mである。大規模な湖沼であれば、このレベルの解像度で水質分布を数百画素×数百画素の詳細さで評価できる。他方、周囲延長が数km程度のダム湖では、画素分割数が十分でない場合がある。また、湖岸と水面にまたがる画素の割合が高くなり、適正な評価が困難となる。今後、打ち上げが予定されているQuick Bird衛星などは、数mの解像度を有し、ダム湖などへの適用が期待される。

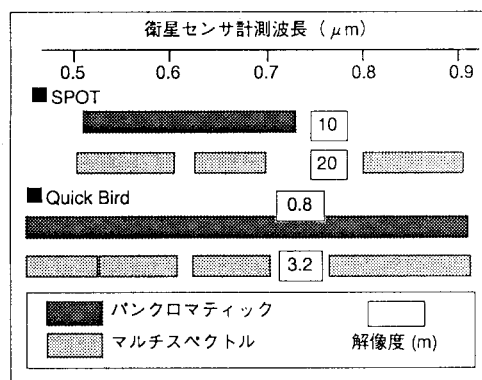


図1 衛星画像の計測波長帯

2. 2 衛星画像による水質評価

衛星画像による水質評価は、湖沼水面の分光反射特性が水質によって異なることを利用する。例えば、可視青バンドの画像からは濁度に関する情報が得られる。また、近赤外バンドの画像は、植物プランクトンに含まれるクロロフィルaとの相関が高いことが良く知られている。これより、マルチスペクトルのバンドを組合せて水質を推定することができる。

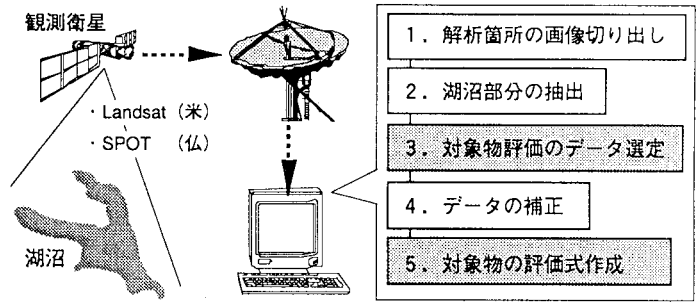


図2 衛星画像による湖沼監視概要

3. 高解像度化手法

3. 1 高解像度化の考え方

パンクロ画像用センサは、図1に示したように可視～赤外波長域を単バンドで計測しているのので、マルチ画像用センサを重複する計測波長を持つ。本研究で開発したマルチ画像の高解像度化手法は、この点に着目した。すなわち、1) パンクロ画像はマルチ画像と重複する情報を含んでいるので、マルチ画像の補正に関する情報を抽出できる、2) パンクロ画像はマルチ画像よりも空間解像度が高いので、パンクロ画像より抽出した補正情報により、マルチ画像の解像度を向上できると考えた。

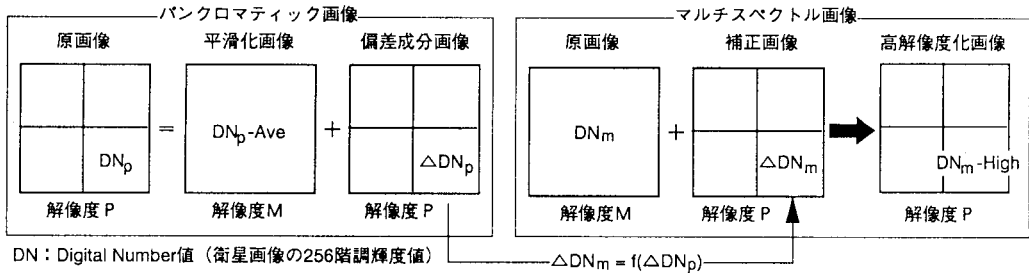


図3 マルチ画像高解像度化の考え方

図3に示すように、解像度Pのパンクロ画像は、解像度Mの平滑化画像に解像度Pの偏差成分を重畳したものとみなすことができる。これと同様に考えると、解像度Mのマルチ画像に対して解像度Pの補正成分画像を重畳すれば、解像度Pのマルチ画像が生成できる。このためには、パンクロ画像の偏差成分 ΔDN_p から、マルチ画像の補正成分 ΔDN_m を算出できる関数 $f: \Delta DN_p \rightarrow \Delta DN_m$ を同定する手法が必要である。

3. 2 高解像度化の手順

本研究で開発した高解像度化手法の手順を図4に示す。3.1節で述べた関数 f を同定するために、各画素の分光放射輝度を推定することなどに特徴がある。手順内の各工程を簡単に説明する。

(1) パンクロ画像平滑化処理

パンクロ画像を平均値フィルタを適用し、平滑化画像画像を生成する。原画像と平滑化画像との差分処理により偏差画像を生成する。フィルタサイズは、パンクロ画像とマルチ画像との空間解像度の比を n であれば、 $n \times n$ 画素と設定する。

(2) カテゴリ展開処理

衛星画像の画素が唯一の地覆種類 (カテゴリ) で覆われていることは少なく、一般には1画内に複数のカテゴリが存在する。カテゴリ展開とは、画素GのDN値を式(1)に示すように代表カテゴリのDN値の線形和で表わす展開係数CEを求める処理である。展開係数CEは、式(1)の連立方程式の解として求める。

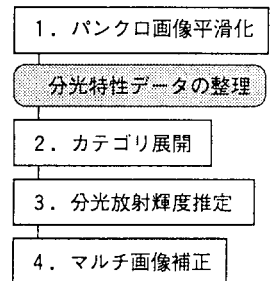


図4 高解像度化手順

$$DN(G) = \sum_C \{CE_C(G) \cdot DN_C\} \quad (1)$$

但し、 $DN(G)$ ：画素GのDN値
 $CE_C(G)$ ：カテゴリCの画素Gの展開係数
 DN_C ：カテゴリCのDN値

ここでの連立方程式は行列式に変換することができ、 CE の求解は代表カテゴリのDN値行列の逆行列計算に帰着できる。逆行列計算には広く知られたGauss-Jordan法³⁾などが適用できる。

(3) 分光放射輝度パターン推定処理

バンクロー画像情報からマルチ画像の補正量を算出するためには、各画素の分光放射輝度パターンが既知である必要がある。このパターンは、カテゴリ展開で求めた展開係数 CE を用いて、式(2)に示す積和計算により各画素に対して推定できる。

$$L(G, r) = \sum_C \{CE_C(G) \cdot L(C, r)\} \quad (2)$$

但し、 $L(G, r)$ ：画素Gの波長 r における分光放射輝度 ($W/m^2/sr/\mu m$)
 $L(C, r)$ ：カテゴリCの波長 r における分光放射輝度 ($W/m^2/sr/\mu m$)

(4) マルチスペクトル画像補正処理

各画素に対して推定した分光放射輝度 L のパターンを用いて、補正量算出のための関数 f を同定する。SPOT衛星の場合には、図5に示すようにバンクロー画像の放射輝度成分(B+C+D+E)のうち、Bに相当する部分はバンド1を説明できる。また、Dに相当する部分はバンド2を説明できる。これより、関数 f は式(3)と式(4)のように表わすことができる。

$$\Delta DN_{m1}(G) = k1 \cdot \frac{B(G)}{B(G)+C(G)+D(G)+E(G)} \cdot \Delta DN_p(G) + k2 \cdot \Delta A(G) \quad (3)$$

$$\Delta DN_{m2}(G) = k3 \cdot \frac{D(G)}{B(G)+C(G)+D(G)+E(G)} \cdot \Delta DN_p(G) \quad (4)$$

但し、 $\Delta DN_p(G)$ ：バンクロー画像の画素GにおけるDN値の偏差量
 $\Delta DN_m(G)$ ：マルチ画像の画素GにおけるDN値の補正量
 $B(G), C(G), D(G), E(G)$ ：画素Gにおける放射輝度成分 ($W/m^2/sr$)；図5参照
 k ：センサの特性係数

算出した ΔDN_m を式(5)に代入し、高解像度化したマルチ画像のDN値である DN_m-High を得ることができる。

$$DN_m-High(G) = DN_m(G) + \Delta DN_m(G) \quad (5)$$

但し、 $DN_m-High(G)$ ：画素Gにおける高解像度DN値

4. 評価解析結果

4.1 ケーススタディ条件

対象区域は、霞ヶ浦に架かる霞ヶ浦大橋付近とした。衛星画像として、SPOT HRV-P (バンクロー) とXS (マルチ) を用いた。シーンはPATH332-ROW278で、計測は1999年12月29日である。カテゴリ展開には、対象区域を優占する1) 森林、2) 作付け前の農地、3) 湖水面の3つを設定した。ここで用いたカテゴリの分光放射輝度は、図6に示すものを用いた。

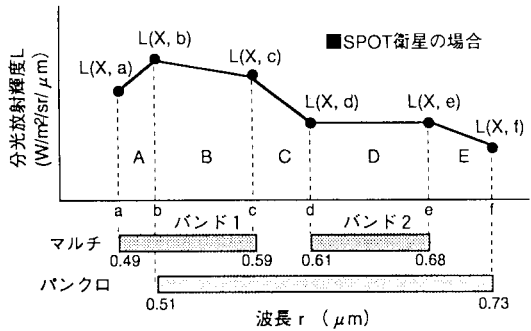


図5 補正ロジックの説明

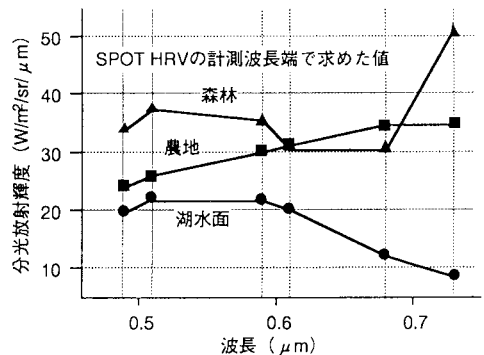


図6 各カテゴリの分光放射輝度特性

4. 2 視認性向上の評価

図7に高解像度化処理前後のバンド2画像を示す。処理前の原画像では、主な土地区分が識別できる程度である。また、霞ヶ浦大橋はいびつな直線となっており、画像右上部の梶無川も識別が困難である。他方、高解像度化処理後の画像では、土地区分が明確に識別でき、定性的には視認性が向上していることが分かる。霞ヶ浦、梶無川ともに視認性が向上しており、パンクロ画像（図示せず）程度の空間解像度となった。

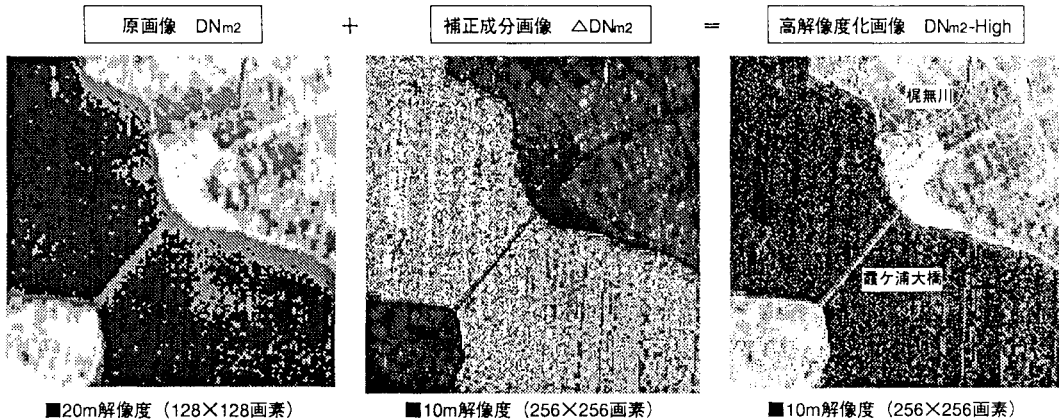


図7 高解像度化処理の結果 (SPOT HRV-XS Band2)

4. 3 高解像度化の精度

提案手法の精度を検証するためには、高解像度化した解像度での真値が既知の画像を準備する必要がある。ここでは、SPOT HRV-P, XSの解像度をそれぞれ20m, 40mに平滑化した画像を作成し、これらの画像に提案手法を適用した。平滑化する前の原画像は、高解像度化処理した画像の真値であるので、両者の比較により精度を検証できる。対象は、土浦港付近の5.12km四方の区域とした。

表2に高解像度化画像と原画像との相関係数R、及び相対誤差の平均値を算出した結果を示す。この結果より、高解像度化により相関係数がバンド1、バンド2ともに向上しており、より真値画像（原画像）に近づいたことが分かる。また、相対誤差の平均値は、バンド1で8.17→5.33%、バンド2で8.26→4.63%に低減している。バンド1とバンド2との比較では、後者の方がより高い効果が得られている。バンド2の計測波長帯は0.61~0.68 μ mであり、計測波長帯の総てがパンクロ画像の計測波長帯に含まれている。これに対して、バンド1の計測波長帯0.49~0.59 μ mのうち、20%に相当する0.49~0.51 μ mの波長がパンクロ画像に含まれていないことが効果の違いの理由と推測される。

表1 高解像度化精度の検証結果

バンド	原画像 (真値) との相関係数 R	原画像 (真値) との平均相対誤差
1	未処理画像	0.83
	処理画像	0.94
2	未処理画像	0.92
	処理画像	0.96

5. 結 言

本研究では、衛星リモートセンシングによる湖沼監視の適用拡大を目的に、マルチスペクトル画像の高解像度化手法を開発した。SPOT HRV画像によるケーススタディの結果、約5%の誤差で空間解像度を20m→10mの2倍に向上できることを確認した。今後打ち上げが予定されているQuick Bird衛星では、3.2m→0.8mの4倍高解像度化できることになり、ダム湖を含む小規模水圏への適用も飛躍的に拡大するものと期待される。

参考文献

- 1) 安岡善文：リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用，環境技術 Vol.12, No.5 (1983)
- 2) 圓佛伊智朗ほか：衛星データ利用による水圏監視技術の検討，第6回環境システム計測制御学会講演論文集 (1996)
- 3) 奥村晴彦：C言語による最新アルゴリズム辞典，技術評論社 (1992)