

砂浜の分光反射率を用いた大気補正法と沿岸域環境情報の抽出に関する研究

泉宮 尊司*・松井 直也**・石橋 邦彦***

本研究では、砂浜の分光反射率データを用いて大気補正を行い、地上の対象物の分光反射率をより正確に推定する手法を開発している。本手法により推定された植物の分光反射率はかなり精度が高く、松および茅類の植物の分類を可能にしている。また、得られた分光反射率データを用いて、河川水の広がりや SS 濃度の高い領域の抽出および松枯れ領域の抽出を行い、現地観測結果ともほぼ一致することから、本手法の有効性が検証されている。

1. 緒 言

沿岸域の汀線変化や水質および植生等の環境情報を広範囲に渡り継続的に取得することは、沿岸域の環境保全やその対策のために極めて重要なことである。しかしながら、多種にわたる環境情報を広範囲に取得するには多額の経費と時間が必要となるため、その調査を継続的に行うことは困難な状況にある。その一つの解決策として、衛星および航空リモートセンシングによる環境情報の抽出法が注目されている(杉森, 1982; 安岡・宮崎, 1982)。すなわち、光学センサによって得られる輝度値データを用いて、種々の環境情報を同定・抽出することが可能となっている(村上ら, 1988; 宮崎ら, 1996)。しかしながら、それらの環境情報の推定精度を高めるためには、季節や気象によって左右される大気の影響を如何にして正確に取除くかが大きな問題であった。

作野ら (1999) は、宍道湖表層のクロロフィル a 濃度の推定において、水域のパスラジアンを画像の暗部より推定する方法(暗画素法)を採用している。この暗画素法は、簡便で利用し易いこともあり、よく用いられている方法であるが、地上対象物以外の反射光による影響を完全に取除くことはできない。

青木・谷口 (2001) は、LANDSAT-TM データの輝度値とクロロフィル a 濃度との関係を調べる中で、大気エアロゾルの影響が有意に現れていることを見出し、その簡便な補正法を提案している。また、これまでもエアロゾルを含む種々の大気補正法が提案されているが、局所的な気象の影響を取除くことはかなり困難である。

そこで本研究では、沿岸域の各地に分布する砂浜の分光反射率のデータを用いて、衛星リモートセンシングデータの大气補正を正確に行うことを提案し、それに基づいて得られた沿岸域の分光反射率データを用いて、松、茅などの海浜植生を分類すると共に、河川水の広がりや SS 濃度の高い領域を抽出することを研究の目的とする。

さらに、得られたデータを用いて松枯れが生じているピクセルを抽出し、航空写真および現地調査結果と比較して、抽出結果の妥当性を検証する。

2. 砂浜の分光反射率を用いた大気補正法

衛星リモートセンシングの輝度値のデータには、大気からの反射光や対象物近傍からの反射光などが含まれており、大気的光透過率にも影響されるため、一般の大気補正アルゴリズムでそれらをすべて補正することはできない。本研究では、季節変化が極めて小さい砂浜の分光反射率を利用して、衛星データの大气補正を行う簡便な方法を試みる。

一般に、波長 λ の電磁波(太陽光)が、地上物体で反射され衛星センサに到達する電磁波強度 $L_s(\lambda)$ と地上物体の反射率 $R(\lambda)$ との関係は、

$$L_s(\lambda) = T_a R(\lambda) \{E_{s\lambda} \Delta\lambda T_\theta \cos \theta + E_D\} + L_p(\lambda) \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここに、 T_θ は太陽光が大気を通して地上に到達するまでの透過率を示し、 θ は太陽の天頂角、 $\Delta\lambda$ はセンサの波長幅、 $E_{s\lambda}$ はその波長帯での単位波長幅当りの平均電磁波強度、 E_D は大気からの反射光が地上物体により反射され、センサに入る電磁波強度である。また、 T_a は地上物体により反射された電磁波が衛星センサに到達するまでの透過率、 $L_p(\lambda)$ は太陽光が大気で反射され、直接センサに入射する電磁波強度である。

地上の物体を識別するには、地上物体の反射率 $R(\lambda)$ の値を知る必要があるが、衛星センサで観測されるのは電磁波強度 $L_s(\lambda)$ であるので、式(1)の右辺において、太陽の天頂角 θ とセンサの波長幅 $\Delta\lambda$ 以外は未知の量であり、直接 $R(\lambda)$ を算定することはできない。しかしながら、式(1)は $R(\lambda)$ に関して線形式であるので、地上の既知の分光反射率 $R(\lambda)$ のデータがあれば、それらの未知係数を推定することができる。

$$L_s(\lambda) = A(\lambda, \theta, M_e) \cdot R(\lambda) + B(\lambda, \theta, M_e) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、係数 $A(\lambda, \theta, M_e)$ および $B(\lambda, \theta, M_e)$ は、

$$\left. \begin{aligned} A(\lambda, \theta, M_e) &= T_a \{E_{s\lambda} \Delta\lambda T_\theta \cos \theta + E_D\} \\ B(\lambda, \theta, M_e) &= L_p(\lambda) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科
** 中越興業(株)
*** 正会員 新潟大学技官 工学部建設学科

で与えられ、気象およびエアロゾル濃度に左右されるため、その要素を M_e の関数として表している。式(1)から式(3)の関係から分るように、衛星データの輝度値は、太陽天頂角や気象要因によって左右されるため、輝度値とクロロフィル a や SS 濃度との普遍的な関係を見出すことは難しい。

本研究では、係数 $A(\lambda, \theta, M_e)$ および $B(\lambda, \theta, M_e)$ を推定するために、季節変化の殆どない砂浜の分光反射率を用いることにした。解析に用いたデータは、2000年8月から9月にかけて新潟県内の砂浜において測定されたものである(泉宮ら, 2001)。なお、2002年においても砂浜の分光反射率を測定しており、2年が経過しても分光反射率が殆ど変化していないことを確認している。

解析に用いた衛星データは LANDSAT-TM データで、2000年8月に観測されたものである。まず、図-1に示すように、砂浜の分光反射率を横軸に、衛星の輝度値を縦軸にプロットし、最小二乗法により1次直線を決定すると、その縦軸の切片の値が大気からの反射光の成分 $L_p(\lambda)$ であり、勾配が透過率、太陽高度、近隣からの反射光等の影響を受ける成分 $A(\lambda, \theta, M_e)$ である。砂浜の分光反射率の変化は10%程度以内であるため、回帰係数が多少変動するので、分光反射率の低い河川水域のデータも一部使用している。図-1に示す Band 3 の場合、相関係数が0.97とかなり高い値が得られた。また、Band 1 および Band 2 の相関係数については、それぞれ0.91および0.93であった。各バンドの $L_p(\lambda)$ の値は、Band 1 から Band 4 までそれぞれ0.178, 0.055, 0.014, および0.024 $\text{mW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ であった。

このようにして推定された2つの係数を用いて、衛星輝度値のデータから地上の対象物の分光反射率を算定している。このような大気補正を行うことによって、簡便

でしかもより正確に大気補正を行うことが可能となる。地上で別途測定された植生や土壌等の分光反射率をもとに、衛星データから得られた4つのバンドの分光反射率を用いて、松や茅等の植生を分類し、さらに SS 濃度の高い領域の抽出を行った。

3. 衛星データによる分光反射率の推定結果

衛星データの輝度値には、前節で示したように大気からの散乱反射光が含まれているので、やや青みがかった画像となる。図-2は、大気補正する前の画像を示しているが、かなり青みがかったものと(黒っぽく)なっている。図-3は、上述の大気補正法を適用して得られた分光反射率の画像である。全体的に鮮明な画像となり、カラー画像では砂浜と砂丘にある畑の砂の色の違いまでも明確に識別できる。この画像には、信濃川沿いに雲が多数発生しており、その影も鮮明に映し出されている。このような気象状況では、水蒸気による影響も有意に現れると

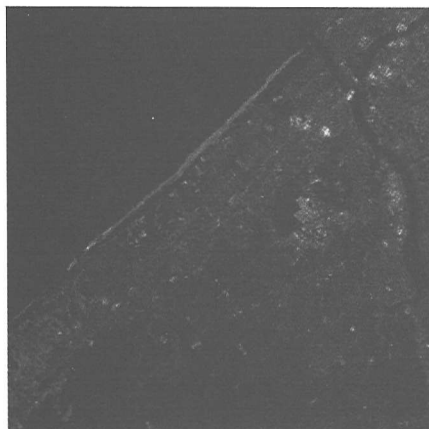


図-2 大気補正前の衛星画像

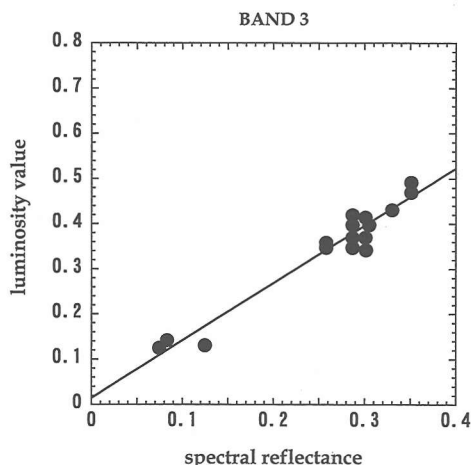


図-1 砂浜の分光反射率と絶対輝度値との関係

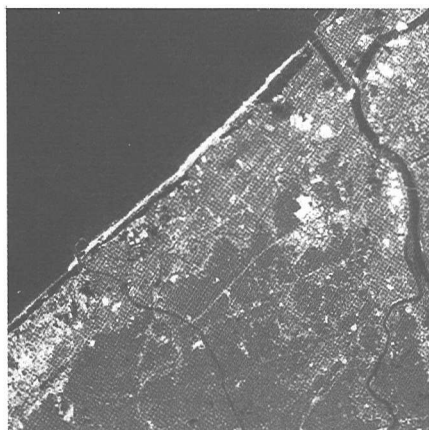


図-3 大気補正された衛星画像

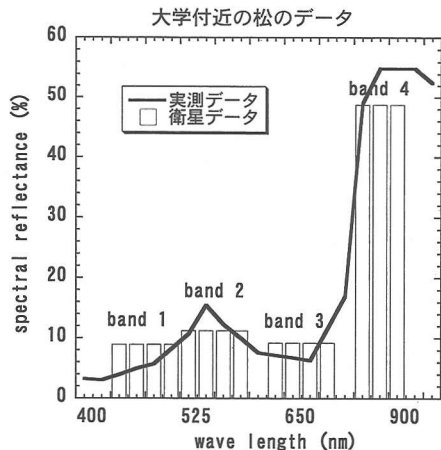


図-4 松の分光反射率の比較

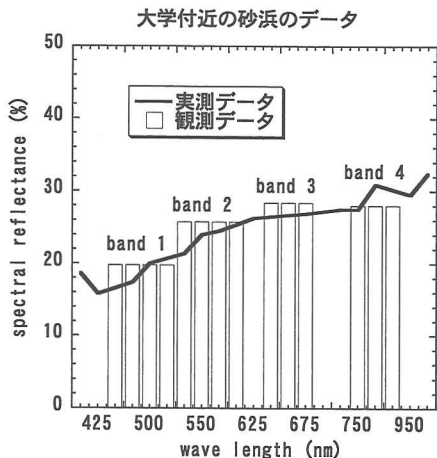


図-5 砂地の分光反射率の比較

考えられるが、本手法ではその影響が係数 $A(\lambda, \theta, M_e)$ および $B(\lambda, \theta, M_e)$ に取り込まれるため、安定した地上物体の反射率が得られている。

図-4 および図-5 は、それぞれ松および砂浜の分光反射率を比較したものである。実測値を実線で、衛星データより推定された分光反射率を柱状図で示している。図-4 の松の分光反射率は、近赤外バンド (Band 4) の 750 nm から 900 nm で反射率が高く、植物の活性度が高いことを示している。衛星データより得られた分光反射率も実測値と同様な変化を示しており、各バンドにおいて反射率の範囲を指定することにより、松林の分類が可能である。図-5 の砂浜は、係数の推定に用いた場所とは異なる場所のデータを比較したものである。衛星のデータから推定した分光反射率は、実測値とほぼ一致しており、本手法の再現性と有効性を示すものである。

4. 環境情報の抽出結果とその考察

4.1 沿岸域における植生域とその分類

植物の活性度および被覆率は、LANDSAT-TM データでは Band 3 と近赤外バンド Band 4 を用いた正規化された植生指標 NDVI によっておおよそ計られることが知られている。図-6 は、新潟沿岸域の植生指標 NDVI の分布を示したものである。一般に、植生指標 NDVI の値が 0.5 以上であれば、植物の活性度および被覆率も高いと言われている。この図を見ると、海岸に沿って細長く植生指標の値の高い地帯が広がっており、これが海岸林 (主として松林) に対応している。一方、陸地側でも植生指標の値の高い地帯が広範囲に広がっている。これは水田地帯であり、NDVI 値の低い道路および農道の形状もかなり明確に読み取れる結果となっている。この図の白く囲った地点付近の信濃川沿いにも、植生指標の高い地域が存在するが、これは高水敷に設けられた水田、畑および自然植生によるものである。なお、関屋分水付近に点在する雲の領域は、NDVI の値が負値を示し、水域とほぼ同様な値を示すことは興味深い。

地上対象物の分類法として、マルチレベルスライス法、ディシジョンツリー法、最短距離分類法および最尤分類法等があるが、本研究ではマルチレベルスライス法とディシジョンツリー法を併用して分類を行っている。現地調査で得た各種の植物の分光反射率を、衛星センサの各バンド幅に合わせて平均値をとり、各バンドの平均値に対して Band 1~Band 3 に関しては、 $\pm 3\%$ 、Band 4 に関しては $\pm 15\%$ の幅を持たせて分類している。Band 4 の幅が大きい理由として、この Band 4 は近赤外領域であり、同じ植生でも値の変動が大きいためである。

図-7 は、新潟沿岸域の植生を分類したものである。こ

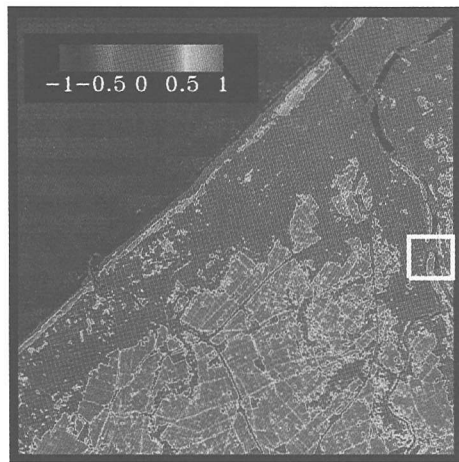


図-6 新潟沿岸域の植生指標 NDVI の分布

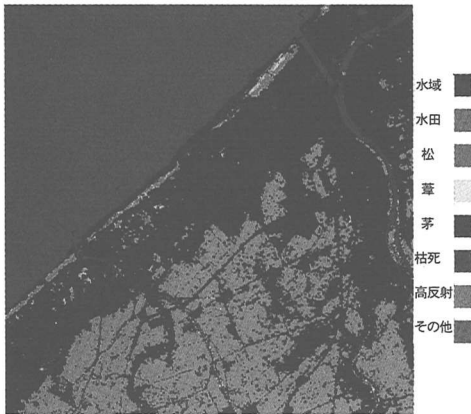


図-7 新潟沿岸域の植生の分類

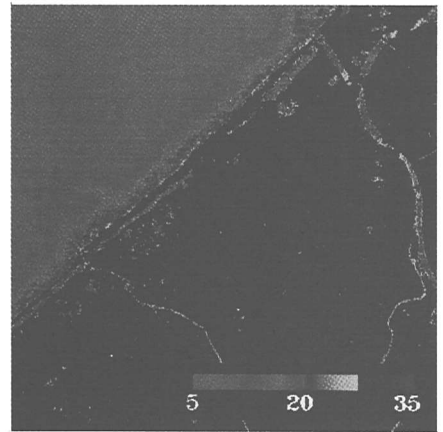


図-8 河川および沿岸水の分光反射率

の図の分類記号の上から、水域、水田、松、葦、茅、枯れた植物(松)、高い反射率をもつ植物およびその他の植物に分類している。この植生域の分類にあたって、植生指標 NDVI が 0.53 以上で植生被覆率が約 60% 以上の領域を選定して分類している。この図の黒い部分は、植生指標 NDVI が 0.53 以下の領域で、主に市街地、道路、砂浜、裸地に相当する領域である。

海岸域の植生指標 NDVI の値の高かった地域の多くは、松に分類されており、松林であることが判読できている。また、同じ地域で NDVI 値がやや高かった所は、葦や茅類に分類されている。現地調査では、砂丘地に自生および人工的に植えられた茅類であり、被覆面積率が高い領域ではほぼ一致している結果となっている。内陸部の植生指標の高かった地域は、水田に分類されており、新川、西川および信濃川に沿って、葦や茅類が覆っている領域が点在していることが分る。

4.2 河川および沿岸水の分光反射率

これまで海洋におけるクロロフィル a 濃度や SS 濃度を衛星画像から推定する試みは、CZCS や SeaWiFS などのセンサを用いてなされており、その推定精度も高くなりつつある (Gordon ら, 1983)。また、最近では LANDSAT-TM データを用いて、閉鎖水域でのクロロフィル a 濃度の推定も試みられている (松永ら, 2000; 青木・谷口, 2001)。これらの推定法は、あるバンドあるいは複数のバンドの輝度値とクロロフィル a 濃度との関係を見出して推定する方法である。

図-8 は、Band 2 の分光反射率を示したものである。河川水および SS 濃度の高い沿岸水を強調するように色調変化を付けている。この図より、関屋分水や新川河口からの高 SS 濃度水が海流・海岸流の影響を受けて、北東方向に流れている様子が分る。また、沿岸の SS 濃度の高い海水は、離岸堤の沖合い 100 m から 200 m まで存在していることも分る。

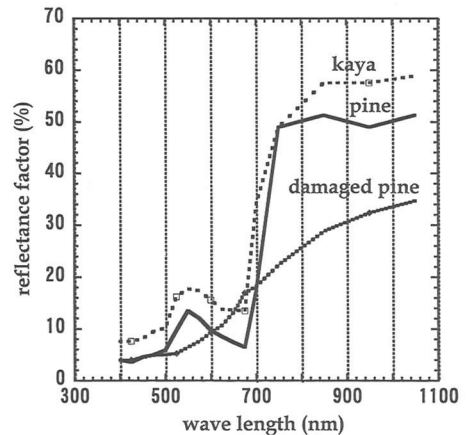


図-9 枯れた松の分光反射率

4.3 松枯れ領域の推定

近年、沿岸域に数多く生えている松の松枯れが全国的に顕著となり、生態系や景観の保全の上で社会問題にまでなっている。直接の原因は、マツノザイセンチュウによるものであるが、硫化物や窒素酸化物等の大気汚染や日照りによる水ストレスが 2 次的な原因とも言われている。松林等の海岸林は、飛砂や飛塩防止や津波遡上抑止効果もあるため、重要な存在である。本研究では、衛星リモートセンシングによって松枯れ領域の抽出を試みることにした。

図-9 は、活性度のある松と枯れた松の葉の分光反射率を示したものである。ちなみに、生きている茅の葉の分光反射率も示している。植物が生きている場合には、800 nm 以上の近赤外領域で反射率が高く、枯れてしまうと近赤外領域の反射率と緑バンドの反射率が小さくなる傾向にある。このことを利用して、松枯れ領域を抽出した。

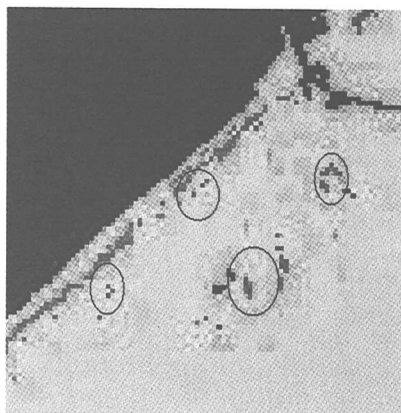


図-10 松枯れ領域の抽出結果

図-10 は、各バンドの分光反射率の変化に基いて松枯れ領域を抽出したもので、丸印をした所に松枯れが存在すると判断された地点である。現地調査および航空写真により、松枯れ地点を検証した結果、衛星リモートセンシングにより抽出された地点はやや多く出たが、70%から80%の正解率であった。衛星データによる推定が誤る原因として、空間分解能が30 mであるので、被覆率が低い場合に他の対象物からの反射光と合成されて、枯れた松と似た反射率を示すためであると考えられた。

5. 結 論

本研究では、砂浜の分光反射率等を用いて衛星リモートセンシングデータの大気補正をより正確に行い、それにより得られた地上の分光反射率を用いて、沿岸域の環境情報を抽出した。その結果、以下の事柄が明らかとなった。

(1) 砂浜の分光反射率を用いて大気補正を行い、地上の対象物の分光反射率を算定しカラー画像化したところ、鮮明で識別が可能な画像が得られた。BAND 1 の大気補正量が最も大きく、光の波長が長くなるほど大気補

正量は小さくなる傾向が認められた。

(2) 本手法により得られた分光反射率は、地上で測定された松の分光反射率とほぼ一致し、本手法の有効性が示された。また、水域の分光反射率を用いて、河川水の広がりやSS濃度の高い領域を明確に示すことができた。

(3) Band 1 から Band 4 までの分光反射率データを用いて、水田、松および茅類の植生を分類できた。また、地上で得られた枯れた松の分光反射率データと衛星により得られたそれを用いて、枯れた松の密度が卓越している領域を抽出したところ、航空写真および現地調査の結果とほぼ一致する結果が得られた。

(4) 以上により、分光反射率の異なる砂浜のデータを用いることにより、大気補正が精度よく行え、本手法は沿岸域の環境情報抽出に有効であることが示された。

参 考 文 献

- 青木伸一・谷口智紀 (2001): ランドサット画像を用いた内湾のクロロフィル濃度の推定, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1466-1470.
- 泉宮尊司・忠平将典・石橋邦彦 (2001): 海浜砂の粒度と分光反射率特性に基づいた海浜砂および漂砂系の分類評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 661-670.
- 作野祐司・松永恒雄・中山大介他 (1999): SPOT/HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層のクロロフィル 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.
- 杉森康宏 (1982): 海洋のリモートセンシング, 共立出版, 275 p.
- 宮崎早苗・灘岡和夫・八木 宏 (1996): 光学理論に基づく海域内物質濃度の逆推定法, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1261-1265.
- 村上和男・菅沼史典・佐藤英治・宮原祐二 (1988): リモートセンシング手法の水質調査への適用, 港湾技術研究所資料, No. 626, 47 p.
- 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, 一回帰分析を用いた大気補正と水質推定一, 日本リモートセンシング学会誌, pp. 101-127.
- Gordon, H. R., et al. (1983): Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight; comparison of ship determinations and CZCS estimates, Applied Optics, Vol. 22, No. 1, pp. 20-36.