

富津海岸林を取り巻く自然環境の衛星リモートセンシング

岩下圭之¹・大木宜章¹・西川 肇¹・工藤勝輝¹・青山定敬²

Satellite analysis methodology for evaluating natural environments surrounding the Futtsu Coastal Forest

Keishi Iwashita・Takaaki Ohki・Hajime Nishikawa・Katsuteru Kudoh and Sadayoshi Aoyama

Abstract : Because of the need for appropriate measures to preserve natural environments, the importance of coastal forests as a natural environment factor must be reaffirmed, and also periodical environmental monitoring of coastal and offshore regions where biodiversity has increased due to human causes is necessary for integrative understanding. A newly satellite remote sensing technology, advocated in this paper, was applied to evaluate the natural environment of coastal black pine forests located on the Futtsu Peninsula. As result, specific environmental features surrounding the Futtsu Peninsula can be visualized through well-digital corrected two different type of satellite data.

1 はじめに

富津岬は千葉県房総半島の西海岸に位置し、木更津の南で東に向かって東京湾に長く突き出た砂嘴である。地質は第四紀層に属する沖積地が主体で、全て新層に属し、川砂と海砂とが混合したもので、小糸川および東京湾の潮流により生成された(小田, 2001)。富津岬先端沖の海上にある第一海堡は関東大震災の際に州が伸びて半島と接続したが、その後分離した(貝塚ら, 2004)。この富津岬の北側には内湾型の植生、南側には外洋型の植生が分布し、海流がもたらしたこの特色のある植生配置から早くから県の天然記念物に指定されている(貝塚ら, 1997)。また富津岬には林帯幅が 50~400m、樹齢が 40~55 年生、樹高が主林帯で 8m 以上のクロマツ海岸林が立地しているが、先端部にはまとまった低湿地が存在しているため、そこに植栽されたクロマツ林では過湿害と見られる枯死被害が頻発している(千葉森林研究センター, 1997)。富津岬における地下水は不圧地下水であり、岬の先端部の付け根部分から先端に向かって流動しており、同時に三角州の両湾側の汀線方向に向っても流動している(千葉県南部林業事務所, 1997)。我が国では昔から海岸林のもたらす恩恵を認識し、多くの海岸林を保育・保護してきた。しかしながら、時代の経過とともに顕著な海岸被害が少なくなってきたことも相まって、管理不足などの人為的な原因などによって樹勢が衰退している海岸林が多くなってきた。自然環境の保全に対する適切な対処が求められている今日、海岸林を取り巻く自然環境を再確認し、海岸林の防災機能に対する調査が必要である。一方、海岸林が立地

する海岸は人間の手で陸域と沿岸域が一体的・総合的に管理される里海として位置づけられ(環境省, 2008)、人手が加わって生物多様性が高くなった沿岸と海域(柳 哲雄, 2006)における自然環境に関する調査も求められるようになってきている。このような現況の基で、海域や陸域における自然環境に関する調査法として衛星リモートセンシング技術活用の有効性が認識され始めている。特に海岸林の調査法として、衛星リモートセンシング技術活用の有効性が確認されている(工藤ら, 2006; 工藤ら, 2008)。衛星リモートセンシングの技術を利用した陸域の立地特性・土地利用、海域の水質・温度分布などの自然環境に関する探査は、衛星で観測される電磁波反射特性を尺度とした画像情報を利用しており、コンピュータ処理による迅速な判読が可能である点において既往の植生調査法とは質を異にしている。本研究は海岸林が大きな面積を占めている富津岬を里海と呼ばれる二次的自然として認識し、衛星リモートセンシングという新しい手法によって富津岬の陸域および富津岬を取り巻く海域の自然環境に関する評価を試みたものである。

2 研究方法

クロマツ海岸林が立地する富津岬を対象に、地表から反射および放射してくる電磁波の反射特性を利用して陸域や海域の状態を探査する衛星リモートセンシングデータによって、特徴的な富津岬を取り巻く自然環境について以下の研究方法で把握した。

(1) 自然環境情報を可視化した画像解析手法

富津岬の立地および土地利用状況、富津海岸林の生育状態、海域の水温および水質などの自然環境に関する情報を衛星データから抽出・可視化する画像解析手法について概説する。

(2) 自然環境を可視化した衛星画像の作成

陸域観測技術衛星(ALOS)および地球観測衛星(Terra)で観測した可視光~赤外線波長域の衛星データを用いた画像解析によって、富津岬周辺域の陸域

¹ 日本大学生産工学部教授, Professor, Faculty of College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

² (株)建設技術研究所副技師長, Deputy Senior Engineer, of CTI Engineering, Co. LTD, 3-21-1 Nihonbashi Hama-cho Chuo-ku, Tokyo 103-8430 Japan

および海域における自然環境を抽出・可視化した衛星画像を作成するとともに、衛星画像から判読される富津岬の植生およびこれを取り巻く海域の自然環境について評価する。

(3) まとめ

本研究で検討した成果を総括するとともに、今後の課題等について記述する。

3 衛星データから情報を抽出する画像解析

衛星リモートセンシング技術は、衛星で観測された画像をそのまま利用するのではなく、そのデータを加工して全く異なった情報を可視化した衛星画像を作り出して利用するのが効果的であり、一般的である。画像解析は、観測波長域の異なる複数の衛星データから必要とする情報を抽出する操作のことをいう。本研究では、シュードカラー表示処理、カラー合成処理、画像間演算処理、分類処理および三次元表示処理などの画像解析によって、富津岬の陸域の自然環境、富津岬を境とした北側の内湾および南側の外湾における海域の自然環境に関する情報の抽出・可視化を試みた。

3.1 シュードカラー表示処理

本処理は、モノクロ濃淡画像に対して行われる人間の色彩感覚を利用した画像の強調法であり、原画像の濃度値域を複数個の小区間に分割し、各小区間に適当に色を割り当てることによりカラー画像化する処理である。連続性を持つ濃淡画像に対しては、赤～紫のレインボーカラーの連続的な色相変化を持たせることが多い。この処理は、水質分布や海面温度などを可視化した衛星画像の作成に利用されている。

3.2 カラー合成処理

本処理は、観測波長帯の異なる3つの衛星モノクロ画像にそれぞれに青・緑・赤の色を割当て合成し、地表被覆状態の違いをその分光反射特性に基づく色調の違いで強調する処理である。この処理は、衛星地図などの作成に利用されている。

3.3 画像間演算処理

本処理は、互いに関連を持った観測波長域の異なる複数の衛星画像間で加減乗除の演算を行い、同じ対象物を同一時刻に観測した波長域の異なる衛星画像よりスペクトル的な特徴を抽出する処理である(高木, 1991)。この処理は、植生域の植生指標による生育状態などを可視化した衛星画像の作成に利用されている。

3.4 分類処理

本処理は、衛星データの各バンドを座標軸とする多次元空間に各画素の輝度値をプロットし、それらの位置の接近度合いにより対象物の類似度を判定する処理である(資源・画像解析センター, 1996)。本研究で試みた陸域における土地利用状態の可視化は、未知の画素データと各分類クラスとの尤度(もっともらしさの尺度)を求め、画素データは尤度が最大となる分類クラスに属するという教師データ無しで分類する最尤法(資源・環境観測解析センター, 1996)によって行った。

3.5 三次元表示処理

本処理は、衛星データと数値標高モデル(Digital Elevation Model)を組合せることにより、任意の視点から国土を眺めた場合の俯瞰画像、すなわち国土の三次元表示画像を作成する処理である(田中ら, 1985; 杉村ら, 1985; John E. Este, et al, 1983)。衛星画像の三次元表示は、数値標高モデルによって衛星データの三次元空間のなかでの位置、またその数値標高モデルを眺める視点の位置および投影面の配置などを与え、さらに数値標高モデル、視点および投影面の三者の幾何学的な関係を設定した後に、二次元座標の衛星データを投影面に写像することによってなされる。この処理は、国土の三次元景観などを可視化した衛星画像の作成に利用されている。

4. 自然環境を可視化した衛星画像

ALOS 衛星およびTerra衛星が観測したリモートセンシングデータを利用した画像解析によって、富津岬の立地特性・土地利用状態・海岸線の植生指標分布(NDVI 分布)および富津岬を取り巻く海域の濁度分布・富栄養化指標分布(Chlorophyll-a 濃度分布)・東京湾の海面温度分布、などの自然環境情報を抽出・可視化した衛星画像を作成した。

4.1 陸域の自然環境

4.1.1 富津岬の立地

図1は、ALOS 衛星のAVNIR-2 センサが2006年8月4日に観測した可視光緑波長域モノクロ画像(Band-2)に青、可視光赤波長域モノクロ画像(Band-3)に赤および近赤外線波長域モノクロ画像(Band-4)に緑をそれぞれ割付けたカラー合成処理画像および既存の50mメッシュ数値標高モデルを用いて、視点：横浜上空800m、視線方位角 110°、俯角 5° に設定した三次元表示処理によって作成した富津岬周辺域の三次元衛星画像である。この画像は人間の目では識別できない近赤外線波長域データを利用して作成しているため肉眼視による自然色と異なった感覚の色調となっており、鮮緑域は農耕地、緑域は広葉樹林、濃緑域は針葉樹林、ピンク域は市街地・工場・裸地などにそれぞれ対応している。画像から、東京湾に長く突き出た特徴的な砂嘴地形、岬先端沖の昔に築造された第一海堡、岬先端から海堡にかけて干潮時に現れる弓状の砂州、岬北側(内湾沿い)の埋立地に建設された広大な重工場群、岬南側(外湾沿い)の磯根崎にかけた漁港や海岸植生で構成された海浜、岬の内陸側に展開する鹿野山の山々、富津岬の植生分布、など富津岬を取り巻く特徴的な人工的および自然的な環境が判読できる。

4.1.2 富津岬の土地利用

図2は、ALOS 衛星のAVNIR-2 センサが2006年8月4日に観測した可視光青波長域(Band-1)・緑波長域(Band-2)・赤波長域(Band-3)・近赤外線波長域(Band-4)データを用いた最尤法による分類処理によって作成した富津岬の土地利用画像である。画像から、クロマツ海岸線の分布状態、中央部に立地する富津公園内の旧陸軍要塞址を囲む濠および先端部に存在する低湿地に生育する県指定の天然記念物かつ国

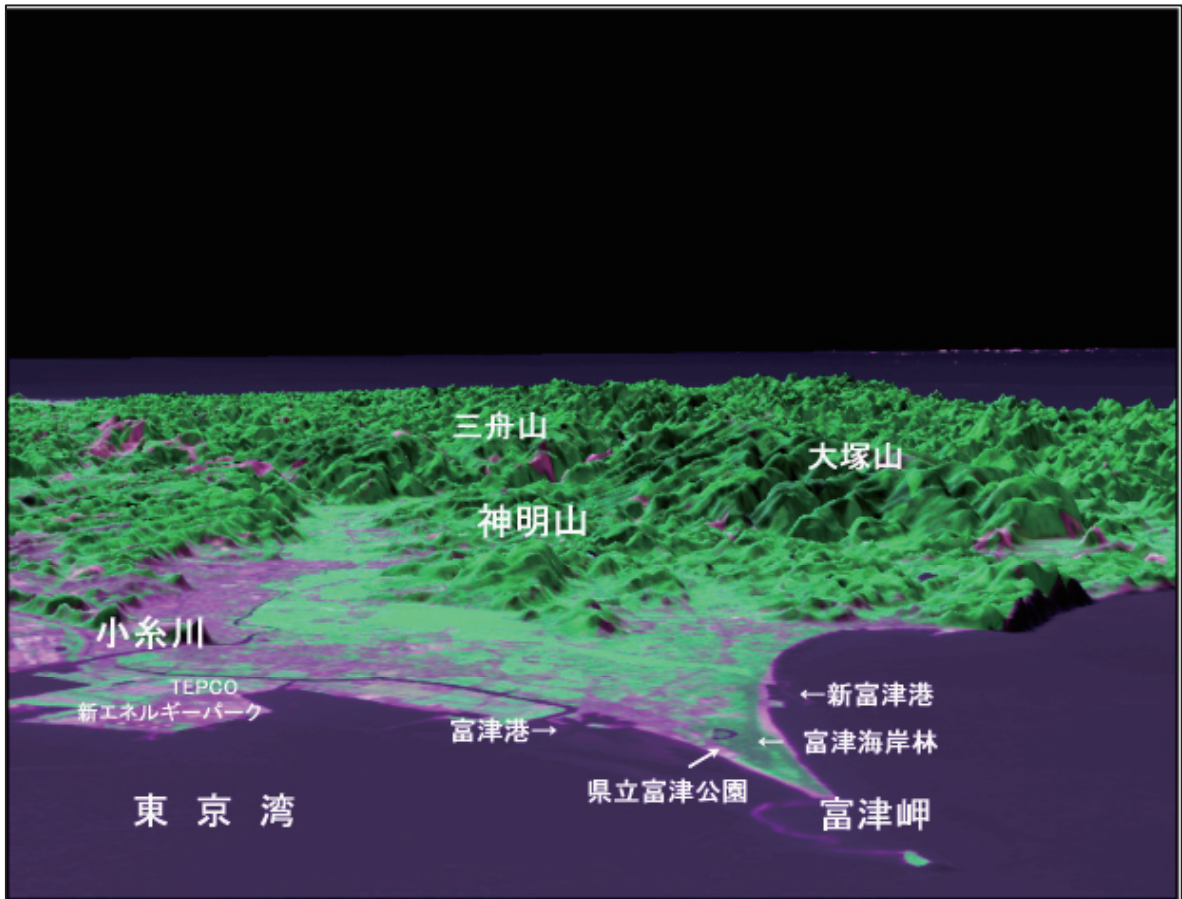


図 1：富津岬周辺域の三次元表示衛星画像
(視点位置:横浜上空の高度 800m, 俯角:-5°, 視線方位角:110°)

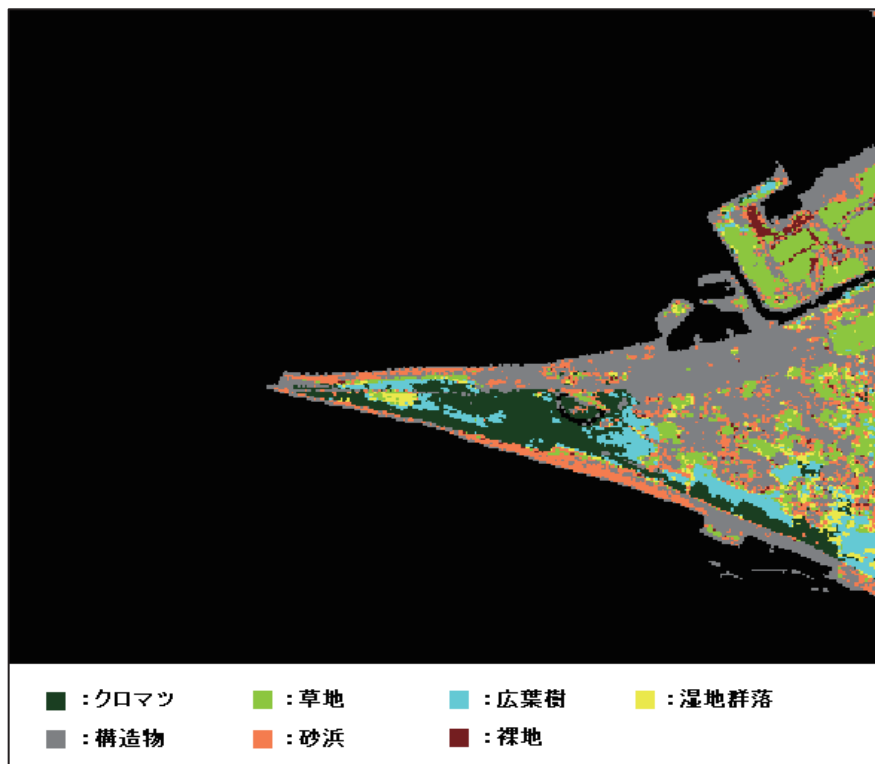


図 2：富津岬周辺の土地利用画像

定公園第一種特別地域に指定されている。植生群落の分布など富津岬特有の土地利用状態が判読できる。

4.1.3 富津海岸林の植生

本研究では、植生指標を媒介して富津岬の植生を判読した。植生指標は、植生が示す電磁波の分光反射特性が他の地表面被覆物に比べて顕著な吸収と反射パターンを示す分光反射特性を利用して、植生の有無、多少および活性度の差異などの生育状態を判定する数量値として利用されている。衛星リモートセンシングで用いられる代表的な植生指標は、下式で算定される正規化植生指標 (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index) である (資源・画像解析センター, 1996)。

$$NDVI = (NIR - VR) / (NIR + VR) \quad (1)$$

ここに、NIR: 近赤外線波長域の衛星データ、

VR: 可視光線赤波長域の衛星データ

波長域: NIR ; 760–840nm VR ; 620–685nm

図 3(a), (b) は、Terra 衛星の ASTER/VNIR センサが夏季および冬季に観測した可視光線赤波長域 (VR ; Band-2) ・近赤外線波長域 (NIR ; Band-3) データを用いた画像間演算処理およびシュードカラー表示処理によって作成した富津岬の NDVI 分布画像である。この画像は NDVI 値の大→小を赤→紫のレインボーカラーに変換してあり、赤域は活性度が最も高く、橙域、緑域になるに従い活性度が低下していると判読できるように可視化してある。画像から、図-2 の土地利用画像で抽出された海岸林域におけるクロマツの NDVI は夏季・冬季とも外湾側のほうが高い値になっており活性度が高く、冬季になると岬先端部と外湾側の漁港付近では植生域の NDVI 値が低下する相対的な変化が判読できる。

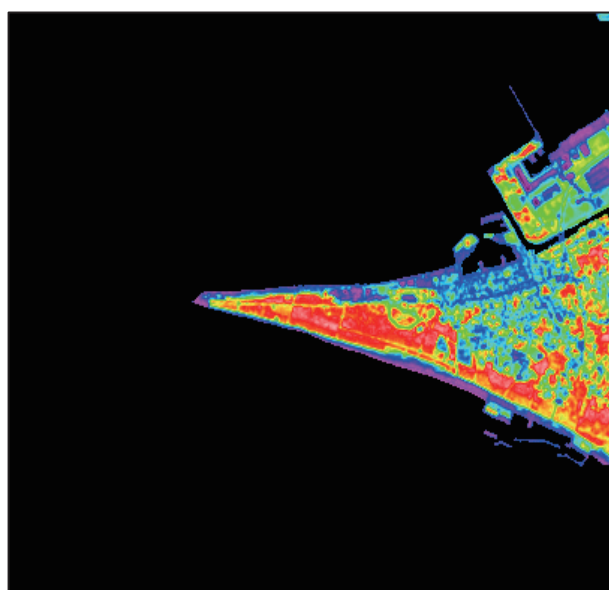
4.2 海域の自然環境

4.2.1 富津岬周辺の濁度分布

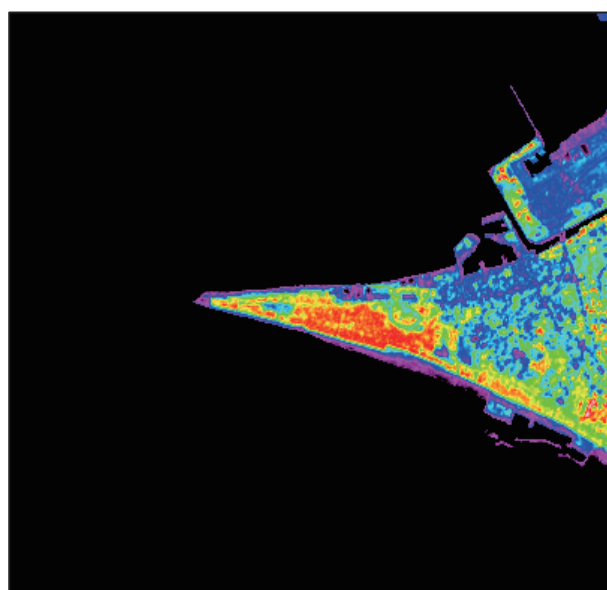
きれいな水が示す電磁波の分光反射特性は、可視光線青波長域～緑波長 low-band 域 (500–530nm) で反射が強く、逆に土砂が含まれた水の反射光は可視光線赤波長域のほうに反射のピークが移動することが知られている。図 4(a), (b) は、Terra 衛星の ASTER/VNIR センサが夏季および冬季に観測した可視光線赤波長域 (Band-2) データを用いたシュードカラー表示処理によって作成した富津岬周辺海域の濁度分布画像である。富津岬は、小糸川からの流出川砂を多く含んだ内湾を時計回りにする潮汐流の働きで砂州を形成し、外洋から磯根崎付近に流れ込む土砂が重なる形で富津岬が形成されたといわれている。海域の濁度分布を可視化した衛星画像から小糸川の川砂が海域に大量に流出している様子が判読でき、この川砂は内湾における時計回りの潮汐流に乗れば富津岬に行き着くと推察され、小糸川の川砂が富津岬の形成に関与していることを実感できる衛星画像である。

4.2.2 富津岬周辺の富栄養化指標分布

富栄養化は水域が貧栄養状態から富栄養状態へ以降する現象をいうが、富栄養化が進行した水域では特定の植物プランクトンが急激に増殖することが知られている。本研究では海域に発生した植物プランクトン (Chlorophyll-a) 濃度を指標として、富津岬を取り囲む海域の富栄養状態を判読した。Chlorophyll-a の分光反射特性は、低濃度の場合は可視光青および緑波長域、高濃度の場合は可視光赤波長域と近赤外線波長域で特徴的なスペクトルを示す。この分光反射特性から導かれた次の四次式アルゴリズムは、海域における Chlorophyll-a 濃度の推定に利用されている (K. Iwashita et al, 2008)。

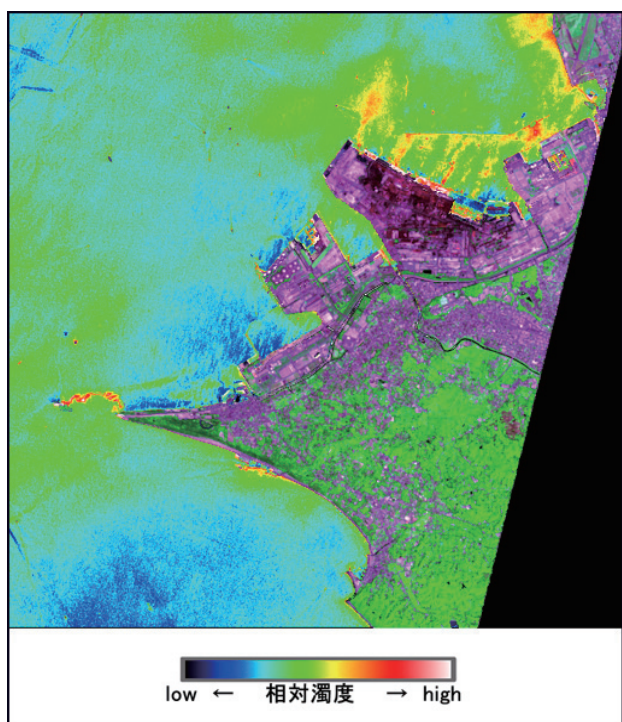


(a)夏季の分布(2008/07/25)

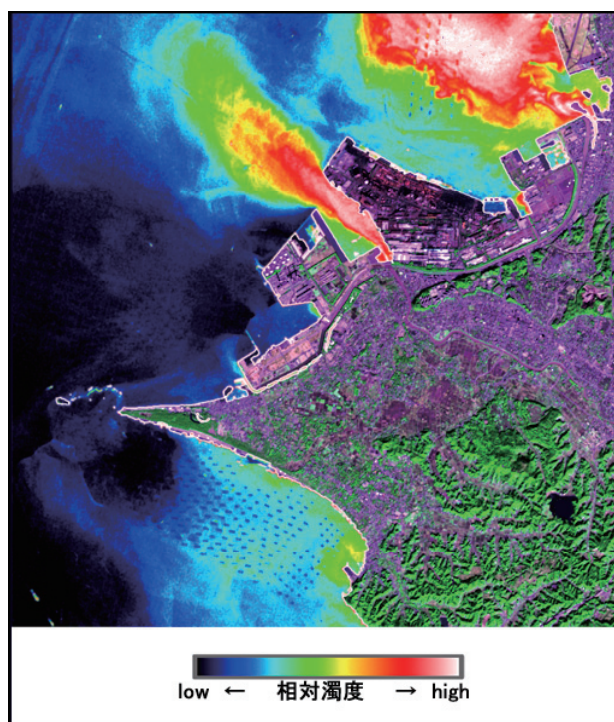


(b)冬季の分布(2006/12/27)

図 3:富津岬の NDVI 分布画像

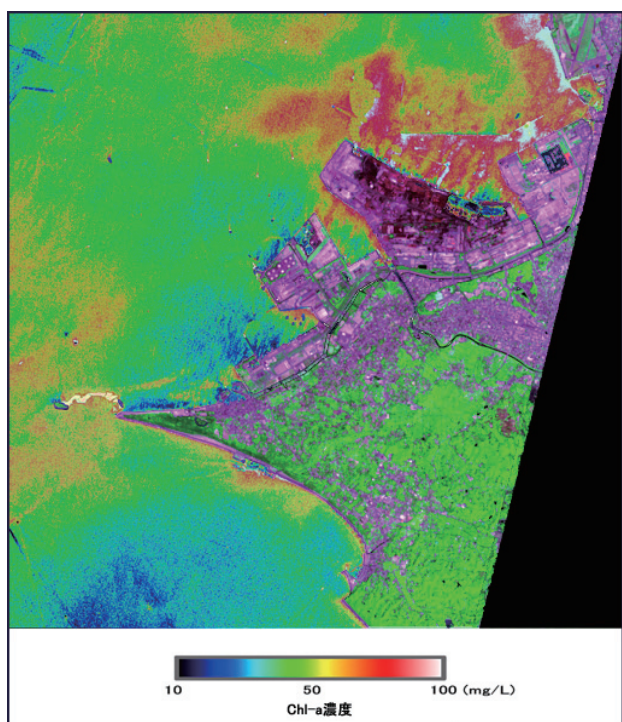


(a)夏季の分布(2008/07/25)

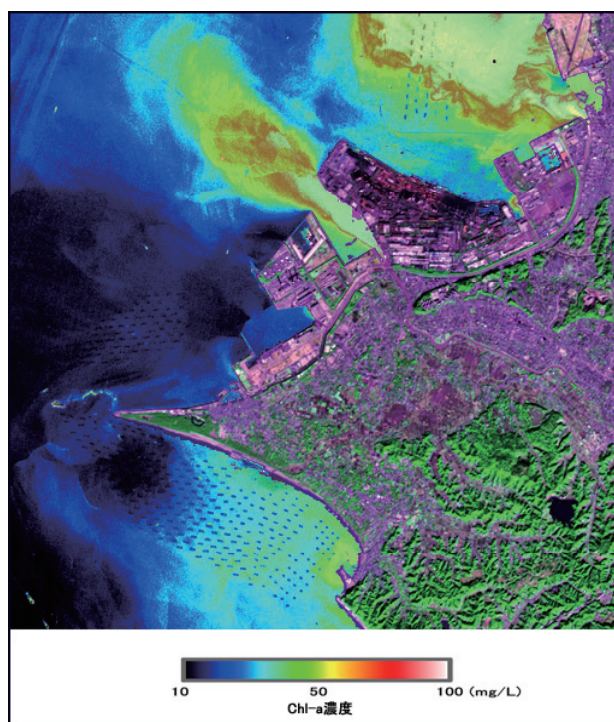


(b)冬季の分布(2006/12/27)

図 4 : 富津岬を取り巻く海域の濁度分布画像

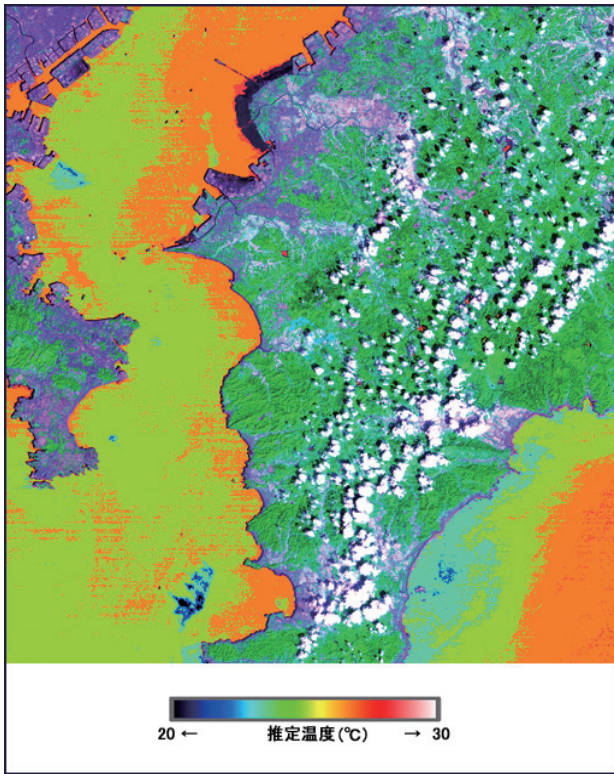


(a)夏季の分布(2008/07/25)

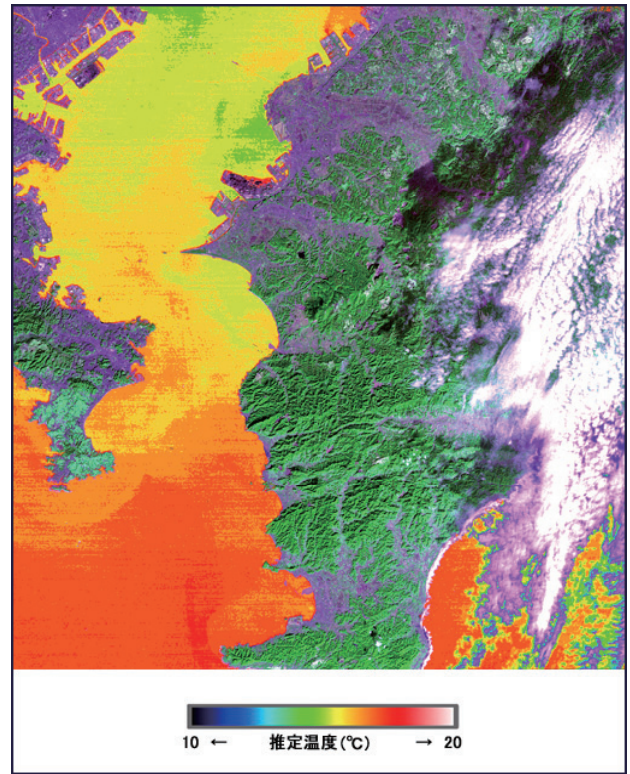


(b)冬季の分布(2006/12/27)

図 5 : 富津岬を取り巻く海域の Chlorophyll-a 分布画像



(a)夏季の分布(2006/09/03)



(b)冬季の分布(2006/12/27)

図 6： 富津岬を取り巻く海域の温度分布画像

$$\text{Chl. -a} = 0.280 - 2.735R_{3M} + 1.457(R_{3M})^2 + 0.659(R_{3M})^3 - 1.403(R_{3M})^4 \quad (2)$$

$$R_{3M} = \text{Log}_{10}(\text{Max of}[(R_{443}/R_{551}) * (R_{662}/R_{751})]) \quad (3)$$

ここに、Chl. -a：クロロフィル濃度(mg/m³),

$R_{443}, R_{551}, R_{662}, R_{751}$: 443, 551, 662, 751 波長帯の反射率,

R_{3M} : (R_{443}/R_{551}) と (R_{662}/R_{751}) とを比較したときの大きい値

図 5(a), (b)は、Terra 衛星の ASTER/VNIR センサが夏季および冬季に観測した可視線赤波長域(Band-2)・近赤外線波長域(Band-3)データを用いた画像間演算処理とシュードカラー表示処理によって作成した富津岬を取り巻く海域の chlorophyll-a 濃度分布画像である。特に冬画像から、富津岬沿岸部の内湾側は外湾側に比べて濃度が低く、外湾の高濃度域は新富津漁港を中心として広がっている様子が判読できる。

4.2.3 東京湾の海面温度分布

ある温度以上に熱せられた物体は、熱エネルギーをも放射する。この放射線はある波長分布を持ち、その分布は個体の温度だけによって決まる。物体の温度が高くなるに従って、その色が波長の短い方へずれることは良く知られている。これは放射量が最大となる波長は、温度に逆比例していることを意味している(日本写真測量学会, 1986)。Wien の変位則によると、黒体放射が最大となる波長は次式で表される。

$$\lambda_m \times T = 2898 \quad (\mu\text{m} \cdot \text{K}) \quad (4)$$

ここに、 λ_m : 波長(μm), T : 絶対温度(K)

(4)式によって、物質がどの波長で最大放射しているか知ることができるとともに、測定対象物の温度域によって捉えるべき電磁波の波長をあらかじめ設定することができる(丸安ら, 1982)。25°Cの海面温度で9.7 μm (熱赤外線波長域)にその最大放射を示す波長であることが分かる。

図 6(a), (b)は、Terra 衛星の ASTER/TIR が夏季および冬季に観測した熱赤外線波長域(Band-13)データを用いたシュードカラー表示処理によって作成した富津岬を取り巻く海域の海面温度分布画像である。画像から、東京湾の温度は夏季には外湾のほうが低く、冬季では反対に外湾のほうが高くなり、夏季は一様な温度分布になる特徴的な温度分布パターンが判読できる。また富津岬付近では、夏季には岬沿岸内側が高温、冬季は外側が低温になる海面温度の分布パターンが判読できる。

5. まとめ

本研究では、陸域および海域が一体として管理・評価される里海として捉えた房総半島富津岬を対象に、衛星リモートセンシング技術を利用して富津岬の陸域およびこれを取巻く海域の自然環境を判読した結果は、以下のとおりである。

(1) 陸域で観測された可視光ー近赤外線波長域の衛星データを用いた三次元表示処理で作成した衛星画像で、鳥瞰図の主体は鋭い穂先の先のように見える富津岬の形とクロマツ海岸林であり、その存在は極めて顕著で、日本では都市化の進んだ東京湾でさえも、このような自然域を保全している状態を判読した。

(2) 陸域で観測された可視光ー近赤外線波長域の衛

星データを用いた分類処理で作成した衛星画像は、広い面積を持つクロマツ林、クロマツ林を囲む広葉樹林、岬先端部の県指定の天然記念物かつ国定公園第一種特別地域に指定されている湿地群落、岬を取り囲む砂浜、内湾側の市街地、外湾側の漁港、などの土地利用を判読した。

(3) 陸域で観測された可視光緑～近赤外線波長域の衛星データを用いた画像間演算処理で作成した衛星画像から、クロマツ林の活性度は夏季・冬季とも外湾側のほうが高く、冬季になると岬先端部と外湾側の漁港付近では低下する相対的な変化を判読した。

(4) 海域で観測した可視光赤波長域の衛星データを用いたシュードカラー表示処理で作成した衛星画像から、小糸川から大量に流出してくる川砂が富津岬を境にした内湾に拡散していく現象を判読した。冬季画像で、濁度レベルに割り当てたレインボーカラー外で、小糸川河口付近（画像中部）ならびに鳥居崎海浜公園～木更津下水処理場付近（画像上部）よりの白色部分は濁度評価アルゴリズム (K. Iwashita et al, 2008) の許容外の超高濃度 (130mg/L 以上) を表している。

(5) 海域で観測した可視光赤波長域～近赤外線波長域の衛星データを用いた画像間演算処理で作成した衛星画像から、海域の Chlorophyll-a ベースの富栄養化レベルは、内湾側が外湾に比べて相対的に高く、この画像において Chlorophyll-a 濃度域が漁港を中心として富栄養化が進行し外湾に広がっている様子が判読できた。また、Chlorophyll-a は相対的に夏季にその増殖が盛んとなる。このことが夏季および冬季の評価画像の色調の違いとして判読されている。

(6) 海域で観測した熱赤外線波長域の衛星データを用いたシュードカラー表示処理で作成した衛星画像から、夏季は一樣な温度分布になる特徴的な温度分布パターン、富津岬付近では夏季には内湾が高温で冬季は外湾が低温になる海面温度の分布パターンを判読した。流動している海域の自然現象については瞬時現象とはいえ広域的に捕捉・評価したが、地球観測衛星による自然環境の探査が開始された1972年以降に観測した蓄積データを用いた画像解析結果の統計的处理による総合的な自然環境の評価が今後の課題である。

東京湾横断道を走行する自動車、羽田を離発着する旅客機、東京湾を航行する船の乗客は、都市化が進んだ東京湾に残された自然美を富津岬で目にする。陸路で富津岬を訪れる大勢の観光客は白砂青松の自然美を身近に感じる。本研究では土地被覆の観点から解析を進めたが、今後は環境工学的ファクターを交えた見地から、海岸林と景観との関係について研究したいと考えている。

引用文献

- [1] Ball, G. H., Hall, D. J., (1965): *ISODATA—Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*, Menlo Park, California, Stanford Research Institute.
- [2] 千葉県森林研究センター(1997): 海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究, 千葉県森林研究センター特別研究, PP. 3
- [3] 千葉県南部林業事務所(1997): 安房・居住地域の海岸県有保安林, PP. 16.
- [4] Este, J. E., Gene, A., Horly, T., (1983): *MANUAL OF REMOTE SENSING*, American Society of Photogrammetry Second Edition, Volume2.
- [5] Iwashita, K., Goodman, T., Dean, E., and Carder, K., (2008): *Chlorophyll-a Evaluation using Terra/MODIS data -Algorithm Theoretical basis-*, EPA Grand Research Individual Final Report, pp, 1-55.
- [6] 貝塚爽平・小池一之・遠藤邦彦・山崎晴雄・鈴木毅彦 編(2004): 日本の地形4 関東・伊豆小笠原, 東大出版会, PP. 159.
- [7] 貝塚爽平編 沼田眞 監修(1997): 東京湾の地形・水質, 築地書館.
- [8] 環境省(2008): 里海創生支援事業とは一里海の創世に向けて.
- [9] 工藤勝輝・西川 肇・藤井壽生・近田文弘(2006): 房総半島クロマツ林の衛星リモートセンシングに関する研究, 海岸林学会論文集, 第5巻, 第2号, PP. 7-14.
- [10] 工藤勝輝・西川 肇・藤井壽生・朝香智仁(2008): リモートセンシングデータを用いた海岸林の生育状態に係わる海岸地盤の地下水環境に関する研究, 土木学会論文集.
- [11] 丸安隆和・淵本正隆(1982): リモートセンシングによる測量設計, 山海堂, pp. 183-184.
- [12] (社)日本写真測量学会 編(1986): 赤外線リモートセンシングの技術と実際, 鹿島出版会, pp. 38-40.
- [13] 小田隆則(2001): 海岸砂丘低湿地における植栽木根系の滞水反応と樹林帯造成法に関する研究. 千葉県森林研究センター特別研究報告, PP. 5.
- [14] 資源・環境観測解析センター編(1996): 新編リモートセンシング用語辞典, pp. 170.
- [15] 資源・環境観測解析センター 編(1996): 新編リモートセンシング用語辞典, pp. 92.
- [16] 杉村俊郎・西川 肇・藤井壽生(1985): ランドサットデータから作成した3次元画像とその将来性 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 85-90.
- [17] 高木幹雄(1991): 画像解析ハンドブック, 東京大出版会, pp. 649.
- [18] 田中總太郎・杉村俊郎・西川 肇(1985): ランドサット MSS データと高解像度数値地形モデルを用いた国土の3次元表示, 地理とコンピュータ特集号, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 130-134.
- [19] 柳 哲雄(2006): 里海論, 恒星社厚生閣, PP. 29-30

[受付 平成21年3月16日, 受理 平成21年6月19日]

