

房総半島クロマツ海岸林の衛星リモートセンシングに関する研究

工藤勝輝¹・西川 肇²・藤井壽生²・近田 文弘³

Study on Satellite Remote Sensing of Coastal Pine Forest at Boso Peninsula

Katsuteru Kudoh¹・Hajime Nishikawa²・Hisao Fujii² and Fumihiko Konta³

Abstract: In an increasing number of coastal forests, tree vigor is declining due to excessive moisture in soil on adjacent land, harmful insects, and area development, leading to concern over maintaining disaster prevention functions and scenic value.

This research analyzed the state of growth and the groundwater environment in coastal forests of black pine spread over the Boso Peninsula in Chiba Prefecture using image processing of satellite data, and examined the usefulness of coastal forest surveys using satellite remote sensing.

Keywords: Black pine coastal forests, spectral reflectance characteristics, satellite remote sensing, growth diagnostics, Boso Peninsula.

1. はじめに

四方を海に囲まれた日本の海岸は約34,000kmにもおよび、その多くは海から来る潮風、飛砂、霧および高潮などによる災害から内陸部を護る役割を担う海岸林が带状に立地している。海岸林にはさまざまな種類の樹木が使われているが、その代表がクロマツである。クロマツの海岸林は昔から風致林として多くの人々から親しまれ、砂浜との組み合わせは日本人が好む白砂青松のイメージの大本をなしてきた。また、海岸林の多くが立地する臨海部には大きな都市、工場生産の諸設備および基幹交通などが集中し、土地利用上極めて重要な地域が形成されている。海洋の影響をまともに受ける海岸線に沿って立地し、その後背地を災害から守ってきた海岸林の持つ防災機能を見過ごすことはできない。

海岸林の生育状態は気象・地況・土壌などの立地特性や密度管理などの人為的条件によって支配されるが、近年、林地土壌の過湿化、虫害および地域開発などによって樹勢が衰退し、防災機能や景観的価

値の保持が懸念されている林分が増えつつあるのが現状のようである。このような現状に対処するには、適切な海岸林の管理に必要な定期的な生育状態などの調査が必要である。しかしながら、線形的に長く分布する海岸林を対象に、地上からの目視などによって生育状態を面的に調査するには、現在の労働環境や経費の面からかなり困難な作業となる。これに対して、地被物の光学特性という物理量を尺度にして地表を広域かつ定期的に観測している衛星を利用したリモートセンシングは、コンピューターを利用した迅速な地被状態の判読が可能であり、分光反射特性(以後、光学特性)に基づいた判読結果に客観性を持つなどの利点がある。地球観測衛星の地上分解能が向上し、観測データの解析ソフトが利用し易くなった今日、海岸林を対象にした植生調査における衛星リモートセンシングデータ(以降 衛星データ)の活用が有効な手段であると思われる。

千葉県の房総半島には太平洋に面した九十九里・和田・平砂浦、東京湾に面した富津にクロマツ海岸林が立地している(画像-1 参照)。九十九里浜および富津岬では地下水による過湿地が多く、無立木地化あるいは疎林化した林地が見られる¹⁾。これらの地下水は不圧地下水である²⁾。本研究は房総半島のクロマツ海岸林を対象に、クロマツ葉の光学特性と生育状態および地下水環境との間に相関性があることを現地調査データの回帰分析によって確認するとともに、その分析結果に基づいたランドサット衛星の画像処理によって生育状態と地下水環境を判読した。

¹ 日本大学生産工学部助教授 Associate Professor, College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumityo, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

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

³ 前国立科学博物館 1360-48 Okabe-mati miwa, Shidagun, Shizuoka, 421-1132 Japan

2 研究の手法

衛星リモートセンシングによって房総半島に立地するクロマツ海岸林の生育状態や地下水環境を探索する本研究は、

(1)立地域の異なる海岸林ならびに不圧地下水の上昇によって過湿化した海岸林におけるクロマツ葉の光学特性を把握するための現地調査

(2)クロマツ海岸林が示す光学特性を可視化する衛星データの画像処理

の2段階に分けて行った。現地調査および衛星データの画像処理の概要は、以下のとおりである。

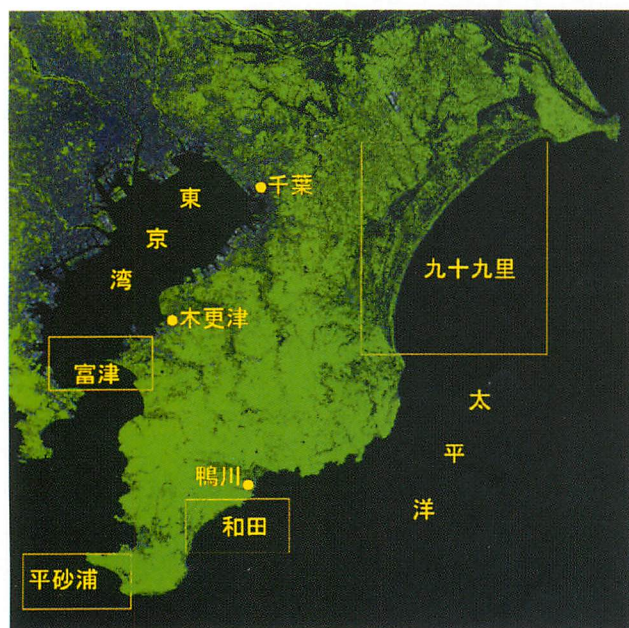
2.1 現地調査の概況

九十九里11ヶ所・和田2ヶ所・平砂浦2ヶ所・富津3ヶ所に設定した生育状態調査地点におけるクロマツ葉の生育状態および分光反射率、白子町付近の九十九里海岸林に設定した10ヶ所の地下水調査地点における地下水深とクロマツ試料葉の光学特性を測定するとともに、測定データの回帰分析によってクロマツ葉の光学特性に対する生育状態および地下水深の関りを確認した。

画像-1は、クロマツ海岸林が分布する房総半島のランドサット画像を示したものである。

図-1は、白子町付近の九十九里海岸林に設定した地下水調査地点の位置を示したものである。

写真-1は、白子町付近の九十九里海岸林に設定した地下水調査地点における観測井およびクロマツ葉の採集対象木を示したものである。



画像-1 房総半島の衛星画像



図-1 地下水調査地点の設定位置



写真-1 地下水調査地点の概況

2.1.1 光学特性の測定

現地で採集したクロマツ試料葉の分光反射率は、試料葉を良く混ぜて白色板に隙間なく同じ厚さに均して載せ、500Wのハロゲンランプを光源としたオプトリサーチ社製の分光放射計 (MSR7000) を用いて測定した。本研究ではランドサット/TMデータを用いてクロマツ海岸林の生育状況を判読するので、現地で測定した分光反射率の波長域もランドサット/TMセンサが観測した波長域に一致させた。

地被物が太陽からの電磁波を受けたときの波長間の応答パターンの違い、すなわち光学特性をある程度まで定量的に表現するための数量値をスペクトル指標と云う²⁾。植物が示すスペクトル指標の代表例が、正規化植生指標 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) である。NDVIは植生の有無・多少・現存量・成長活力などの衛星データによる識別に良く利用され、現存量や成長活力が大きい植生ほどNDVIの値は高くなる。NDVIは、次式で示す分光反射率で算定される³⁾。

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

ここに、VR:可視光赤波長域の反射率、NIR:近赤外線波長域の反射率

植物の生育状態の違いは、NDVIの他に可視光緑波長域の反射率(VG)および中間赤外波長域の反射率(MIR)にも現れる⁴⁾。VGは植物の緑要素が強ければ反射が上昇し、MIRは葉緑素含有量が多ければ反射が低下する特性を有する⁵⁾。本研究では、VG・MIR・NDVIを現地で測定し、これらの組合せで算定したスペクトル指標によってクロマツ葉の光学特性を数量化して回帰分析に供した。

2.1.2 生育状態の測定

植物は光合成作用によって植物性有機物を生産し、植物体として増加蓄積され、その量は乾物重で示される⁶⁾。植物体が時間の経過にともなって、その大きさや重量が増加することを生長という⁷⁾。本研究では、乾物生産の担い手である葉の生長量によって生育状態の違いを判読できると定義して、緑の葉の乾物重(TDW)と葉面積(LA)を測定し、下記(2)式で計算される比葉面積(SLA)によって生育状態を数量化し回帰分析に供した。なお、SLAは葉の形態形成と直接かかわる要素であり、葉が厚くなるほどSLAの値は小さくなる⁸⁾。細長い形態を持つクロマツ葉を対象にした場合には、SLAの値は葉の太さを示す指標になる。

$$SLA (\text{cm}^2/\text{g}) = LA / TDW \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここに、LA:葉面積(cm^2)、TDW:乾物重(g)

(1) 葉面積(LA)の測定

分光反射率の測定に供したクロマツ試料葉から無作為に選択した10試料葉を白色のケント紙上に間隔を空けて固定し、スキャナーを用いたパソコン処理によって測定した10葉の鉛直投影葉面積から、1試料葉当たりの面積(cm^2/g)に換算して求めた。

(2) 乾物重(TDW)の測定

葉面積の測定に供したクロマツ10試料葉を乾燥炉に入れて100℃で1時間保った後、80℃で乾物重が一定になるまで48時間乾燥した後に測定した重量から、1試料葉当たりの重さ(g)に換算して求めた。

(3) 地下水深(GWD)の測定

白子町付近の九十九里海岸林に設定した地下水調査地点に深さ2.0mの地下水観測井を鉦研工業社の

ポータブルドリルを使って鑿井し、地表面から地下水面までの地下水深(m)を測定した。

2.2 現地調査データの回帰分析手法

クロマツ試料葉のSLAおよび海岸林におけるGWDを目的変数、NDVI・VG・MIRを説明変数とするスペクトル指標の算定式に相当する4 Caseの線形重回帰式を設定し、各説明変数に掛かる偏回帰係数、定数、有意確率および重相関係数をCaseごとの回帰分析によって求め、SLAおよびGWDに最も相関性の高い線形重回帰式を見出した。各Caseに設定した線形重回帰式は、下式のとおりである。

$$(\text{Case1}): a_1(VG) + b_1(VR) + c_1(NIR) + d_1 \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$(\text{Case2}): a_2(VR) + b_2(NIR) + c_2(MIR) + d_2 \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$(\text{Case3}): a_3(VG) + b_3(NDVI) + d_3 \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$(\text{Case4}): a_4(MIR) + b_4(NDVI) + d_4 \quad \text{-----} \quad (6)$$

ここに、a, b, c:偏回帰係数、d:定数

2.3 衛星データの画像処理法

海岸林を観測した衛星データから海岸林の生育状態および生育状態を媒介とし地下水環境を判読するための画像処理法は、以下のとおりである。

2.3.1 前処理

衛星データから地被状態を高精度で判読するには、観測データに含まれている観測時の大気、衛星の位置や姿勢、センサの観測系などに起因する歪を除去する前処理が必要である。また、現地調査で確認したクロマツ葉の生育状態に相関するスペクトル指標の算定式を衛星データの画像処理に適用するためには、各観測波長域の衛星データを分光反射率にあらかじめ変換しておく必要がある。本研究で行った幾何補正、大気補正および衛星データの反射率への変換などの前処理は、以下の要領で行った。

(1) 幾何補正

衛星データには、センサに起因する内部歪とセンサを搭載する衛星の位置、高度、姿勢などに起因する外部歪が含まれている。このような衛星画像の幾何学的歪みを除去する操作を幾何補正という。本研究では、時間的な位置および形状変化の影響を受け難い橋梁や道路の交差点などの地上検証地点(GCP)を用いて画像座標系と幾何学的歪の無い地図座標との間の変換式を求め、この変換式を用いて衛星データの幾何学的歪みを補正した。なお、入力画像における各画素データの出力画像への再配列については最近隣内挿法によった¹⁰⁾。また、センサに起因する

内部歪については、バルク補正済の衛星データを購入することにより補正を除外した。

(2) 衛星データから放射輝度への変換

下記(7)式に示す変換式を用いて¹¹⁾、衛星データ(DN値)から放射輝度への変換を行った。

R=(v/Dmax) × (Rmax-Rmin) + Rmin (7)

ここに、R:絶対放射輝度(mW/m²・sr)、v:DN 値、Dmax : 255、Rmax : 検出器の最大放射輝度(mW/m²・sr)、Rmin : 検出器の最小放射輝度(mW/m²・sr)

なお、ランドサットETMセンサの最大・最小放射輝度は地球観測データ利用ハンドブックから引用した。

(3) 放射輝度から反射率への変換

下記(8)式に示す変換式¹²⁾を用いて、衛星データから変換した放射輝度を反射率へと変換を行った。

ρ_p=(Π・L_λ・d²)/(ESUN_λ・cos θ_s)..... (8)

ここに、ρ_p:反射率、L_λ:放射輝度、d:地球-太陽距離(天文単位)、ESUN_λ:平均太陽の放射照度、θ_s:太陽の天頂角(°)

なお、dおよびESUN_λは参考文献(16)のに記されたTableから、θ_sは衛星データのMate dataに記されている太陽の高度角から得た。

2.3.2 地被状態を画像化する画像処理

衛星リモートセンシングは、観測された衛星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作り出して利用するのが効果的である。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・可視化する操作を画像処理という。本研究では、海岸林の生育状態および地下水環境について、以下に示す衛星データの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可視化した。

(1) 画像間演算処理

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、波長域の異なる衛星画像を用いてスペクトル的な特徴を抽出する処理である¹³⁾。本研究では、観測波長域の異なる衛星データから得られるスペクトル指標の算定の過程で本処理を行った。

(2) シュードカラー表示処理

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の小区間に分割し、各小区間に適当な色を割り当てることにより、カラー画像化する。連続性を持つ濃淡画像に対しては、赤ー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。本研究では、海岸林におけるスペクトル指標の算定値および地下水深を画像出力する過程で本処理を行った。

3 研究結果と考察

房総半島のクロマツ海岸林を対象にした現地調査の測定データ、現地調査データの回帰分析および衛星データの画像処理の結果は、以下のとおりである。

3.1 現地調査結果と考察

3.1.1 現地調査データ

表-1は、九十九里・和田・平砂浦・富津の各海岸林に設定した生育状態調査地点で採集したクロマツ試料葉のSLA、分光放射計で測定したVG、VR、NIR、MIRおよびNIRとMIRから算定したNDVIを示したものである。

表-2は、白子町付近の九十九里海岸に設定した地下水調査地点で測定したGWDおよび水位観測井の近くで採集したクロマツ試料葉のVG、VR、NIR、MIRおよびNDVIを示したものである。

表-1 生育状態調査地点における測定データ

調査地点	比葉面積 (cm ² /g)	分 光 反 射 率 (%)				正規化植生指標 NDVI
		VG	VR	NIR	MIR	
k-1	39.762	33.861	26.718	64.010	19.488	0.411
k-2	37.457	34.859	30.569	74.574	26.239	0.419
k-3	37.292	30.493	21.492	73.730	22.869	0.544
k-4	39.375	31.818	27.401	73.803	24.701	0.458
k-5	39.952	21.824	19.172	67.232	27.081	0.556
k-6	54.025	33.085	29.351	64.602	21.821	0.375
k-7	41.647	35.473	26.936	74.433	19.227	0.469
k-8	37.842	29.460	21.734	78.113	24.112	0.565
k-9	46.775	28.379	24.432	74.311	24.858	0.505
k-10	37.762	35.136	27.609	75.205	16.534	0.463
k-11	37.222	32.497	24.762	72.761	20.068	0.492
W-1	35.591	26.857	24.043	75.267	21.839	0.516
W-2	35.200	28.956	21.068	70.069	23.686	0.538
H-1	54.469	26.865	21.248	62.847	28.021	0.495
H-2	37.031	29.800	22.109	75.267	26.912	0.546
H-3	37.206	33.054	26.335	69.117	22.857	0.448
F-1	106.643	37.627	33.556	50.037	21.265	0.197
F-2	72.625	44.137	35.199	58.791	25.710	0.251

(注) K: 九十九里海岸林 W: 和田海岸林 H: 平砂浦海岸林 F: 富津海岸林

表-2 地下水調査地点における測定データ

観測日	観測地点	地下水深 (m)	分 光 反 射 率 (%)				植生指標 NDVI
			VG	VR	NIR	MIR	
11月26日/2004	1	0.320	13.075	11.709	49.032	23.020	0.614
	2	0.990	12.536	12.635	53.019	15.605	0.615
	3	0.400	12.394	12.211	49.365	24.522	0.603
	4	0.660	15.394	11.811	53.286	24.522	0.637
	5	0.340	17.319	15.637	49.017	25.034	0.516
	6	0.650	16.480	15.419	53.536	30.275	0.553
	7	0.280	15.492	16.031	52.748	23.766	0.534
	8	0.380	12.554	12.898	49.231	24.088	0.585
	9	0.450	13.932	14.405	54.037	20.736	0.579
	10	0.600	13.070	12.890	51.435	21.717	0.589
12月26日/2004	1	0.590	10.233	14.287	55.463	15.118	0.580
	2	1.090	12.223	13.963	59.239	15.551	0.618
	3	0.880	10.273	14.774	54.387	25.376	0.573
	4	1.100	11.263	13.467	56.873	26.347	0.617
	5	0.760	10.376	12.872	50.238	21.468	0.592
	6	1.100	11.764	13.684	56.439	21.346	0.610
	7	0.820	15.674	16.275	55.228	22.187	0.545
	8	0.940	16.132	15.568	57.998	23.783	0.576
	9	0.790	8.798	12.783	51.294	20.375	0.601
	10	1.180	9.503	13.289	57.267	26.437	0.623

3.1.2 生育状態と光学特性の回帰分析

房総半島の海岸林に設定した生育状態調査地点におけるクロマツ試料葉のSLAとCase1～Case4の線形重回帰式との回帰分析結果は、以下のとおりである。

(1) 回帰分析の結果

表-3は、房総半島におけるSLAと線形重回帰式との回帰分析結果を示したものである。表中の重相関係数は回帰式の有効性を評価する指標で、1に近いほど実際に役立つと判定でき、自由度で補正した寄与率から求めた⁹⁾。有意確率は線形重回帰式の統計的有意性を評価する指標で、有意水準0.05以下であれば設定した線形重回帰式との相関は意味があると判定できる。

表-3 SLAと線形回帰式の回帰分析結果

Case	線形重回帰式	重相関係数	有意確率
1	SLA=-0.410(VG)+1.459(VR)-1.785(NIR)+145.8	0.871	3.50E-05
2	SLA= 1.120(VR)-1.775(NIR)+0.311(MIR)+133.	0.871	3.48E-05
3	SLA=-1.771(VG)-217.568(NDVI)+202.239	0.878	6.11E-06
4	SLA= 1.015(MIR)-154.691(NDVI)+93.399	0.842	3.74E-05

(2) 回帰分析結果の考察

生育状態調査地点で測定したSLAに応じて変動する線形重回帰式は、Case 3に示すVGとNDVIとの組合せが最も高い相関を示した。線形重回帰式のVGおよびNDVIに掛かる偏回帰係数の符号から、SLAに対してVGおよびNDVIは負の相関を示すことが分かった。すなわち、VGとNDVIの値が大きいほど葉が太いことを意味している。以上の回帰分析結果から、海岸林における生長量の違いが次式によって算定されるスペクトル指標と相関性が高いことを確認した。

SLA=-1.771(VG)-217.568(NDVI)+202.239 (9)

図-2は、現地調査データの回帰分析で最も高い重相関係数を示したSLAとスペクトル指標との関係を示したものである。

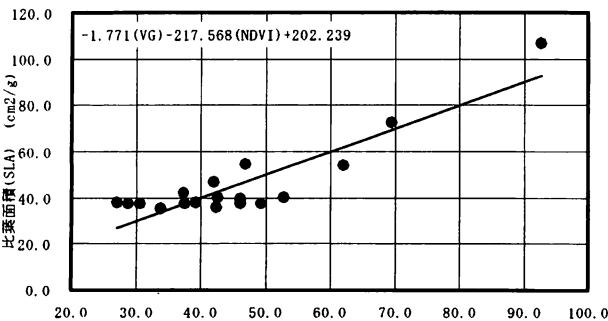


図-2 SLAとスペクトル指標との関係

3.1.3 地下水深と光学特性の回帰分析

白子町付近の九十九里海岸林に設定した地下水調査地点におけるGWDとCASE1～CASE4の線形重回帰式との回帰分析結果は、以下のとおりである。

(1) 回帰分析の結果

表-4は、白子町付近の九十九里海岸林におけるGWDと線形重回帰式との回帰分析結果を示したものである。

表-4 GWDと線形回帰式との回帰分析結果

Case	線形重回帰式	重相関係数	有意確率
1	GWD=-0.028(VG)-0.037(VR)+0.075(NIR)-2.417	0.819	9.965E-05
2	GWD=-0.071(VR)-0.083(NIR)+0.005(MIR)-2.41	0.796	2.357E-04
3	GWD=-0.024(VG)+3.156(NDVI)-0.826	0.398	0.090
4	GWD=-0.001(MIR)+4.228(NDVI)-1.741	0.355	0.123

(2) 回帰分析結果の考察

九十九里海岸林におけるGWDの差異に応じて変動するクロマツ試料葉が示すスペクトル指標は、Case 1に示すVG・VR・NIRを組合せた線形重回帰式が最も高い相関を示した。線形重回帰式のVG・VR・NIRに掛かる各偏回帰係数の符号から、GWDに対してVGおよびVRは負、NIRは正の相関を示すことが分かった。すなわち、クロマツ海岸林土壌の不圧地下水深はクロマツ葉が示すVG・VR・NIRの値と相関性があり、VGとVRの値が小さく、NDVIの値が大きいほど地下水深が深いことを意味している。以上の回帰分析結果から、九十九里海岸林における地下水深の違いが次式によって算定されるスペクトル指標と相関性が高いことを確認した。

GWD=-0.028(VG)-0.037(VR)+0.075(NIR)
-2.417 (10)

図-3は、回帰分析で最も高い重相関係数を示したGWDと光学特性(スペクトル指標)との関係を示したものである。

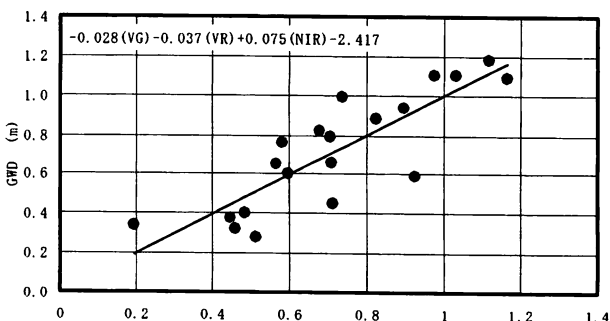


図-3 GWDとスペクトル指標との関係

3.2 衛星データの画像処理結果と考察

房総半島における立地および地下水環境の異なる海岸林を対象に、現地調査で確認したクロマツ葉の生育状態と光学特性および海岸林の地下水深と光学特性との関係に基づいて、2001年6月4日観測のランドサット/TMデータの前処理と画像処理によってクロマツ海岸林の生育状態および地下水環境を判読した。

3.2.1 房総半島海岸林の生育判読

現地調査で確認したSLAとスペクトル指標との関係をSLAと衛星データのスペクトル指標との関係に変換した下記の変換式を用いて、九十九里・和田・平砂浦・富津海岸林における生育状態を判読した。

$$SLA (cm^2/g) = -1.771 (B2) - 217.588 \{ (B4-B3) / (B3+B4) \} + 202.239 \quad (11)$$

ここに、B2, B3, B4: ランドサット TM/Band2, 3, 4 データから変換した反射率

(1) 生育判読画像

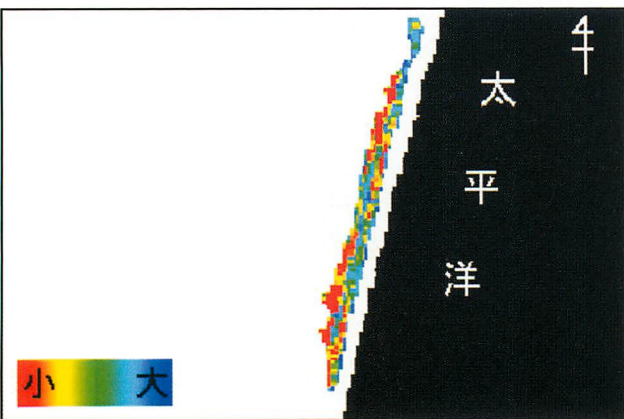
画像-2は、(11)式を用いた四則演算処理で求めたSLA地域分布から、房総半島の各海岸林における生育状態を判読した画像である。SLAの違いは赤～青色のレインボーカラーで表示しており、赤色域がSLAの最も小さい個所で、橙～青色に変化するに従ってSLAが大きくなるように画像出力してある。

(2) 判読結果の考察

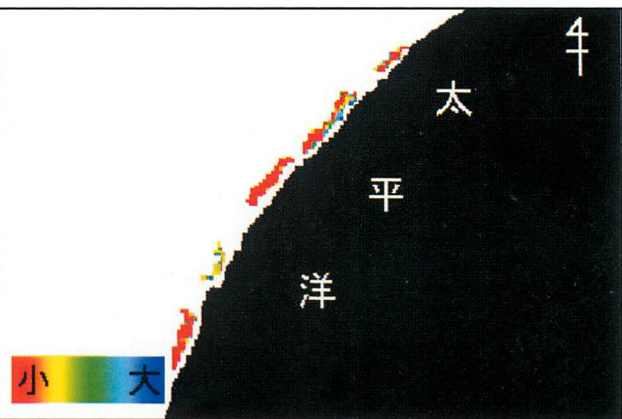
衛星データの画像処理によって判読した房総半島に分布するクロマツ海岸林のSLAで評価した生育状態は、以下のように判読できる。なお、SLAは小さい葉ほど生長量が高いと判定している。

・九十九里海岸林

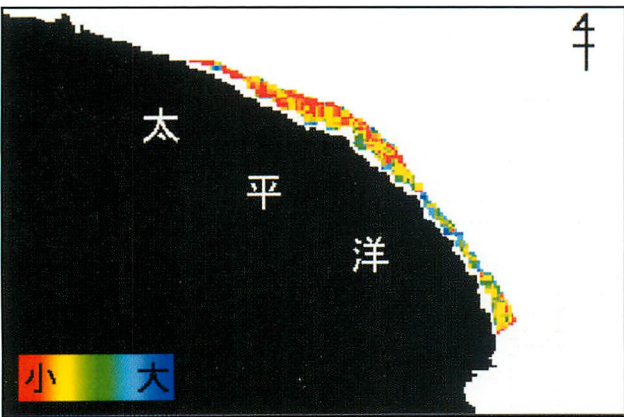
赤～黄域で示される生長量の高い個所が北部(画像上部)と南部(画像下部)の陸側に分布しており、中央部と南部の海側に生長量の低い緑～青域が分布している。林帯中央部を境にして分布パターンが異なる傾向は、林帯中央部を南北に縦断している有料道路の影響を捉えているのではないかと考えられる。



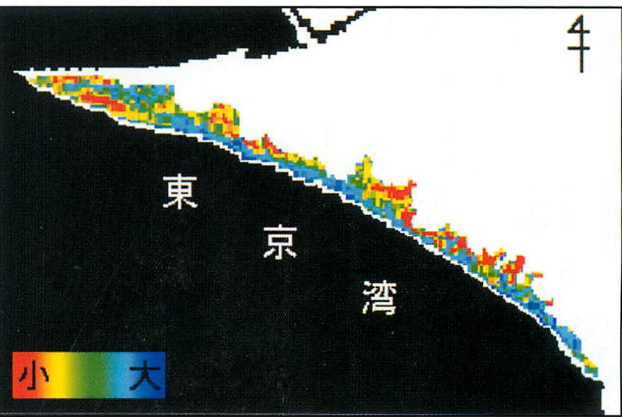
(a) 九十九里海岸林



(b) 和田海岸林



(c) 平砂浦海岸林



(d) 富津海岸林

画像-2 衛星データで判読した海岸林の生育状態

- ・和田海岸林
赤域で示される生長量の最も高い個所が全体的に分布しており，房総半島の中で最も生長量の高い生育状態が見られる。
- ・平砂浦海岸
黄～緑域で示される生長量が中程度の個所が全体的に，生長量の低い青域が林帯幅の小さい個所に分布している。
- ・富津海岸林
緑～青域で示される生長量の低い個所が海側の林縁部と西部(画像上部)の中央部に，赤～黄域で示される生長量の高い個所が陸側に多く分布している。本海岸林は房総半島の南端に立地しており，海岸に吹き付ける強風の影響を捉えているのではないかと考えられる。

3.2.2 衛星データによる地下水環境判読

白子町付近の九十九里海岸林における現地調査で見出した地下水位に関わるクロマツ葉の分光反射率を衛星データに変換した下記の変換式を用いて，海岸林における地下水深の分布を判読した。

$$\text{GWD(m)} = -0.028(B2) - 0.037(B3) + 0.057(B4) - 2.417 \quad (12)$$

(1) 判読画像

画像-3は，ランドサット/TMデータの画像処理で作成した白子町付近の九十九里クロマツ海岸林の生育状態および地下水環境を評価した3つの衛星画像

を示したものである。

画像(a)はランドサットのVG・VR・NIRに(青・緑・赤)を割付けて合成して作成した植生域が赤系統色で表示される一般的な衛星画像で，植生の種類等に対応して色調が変化する。

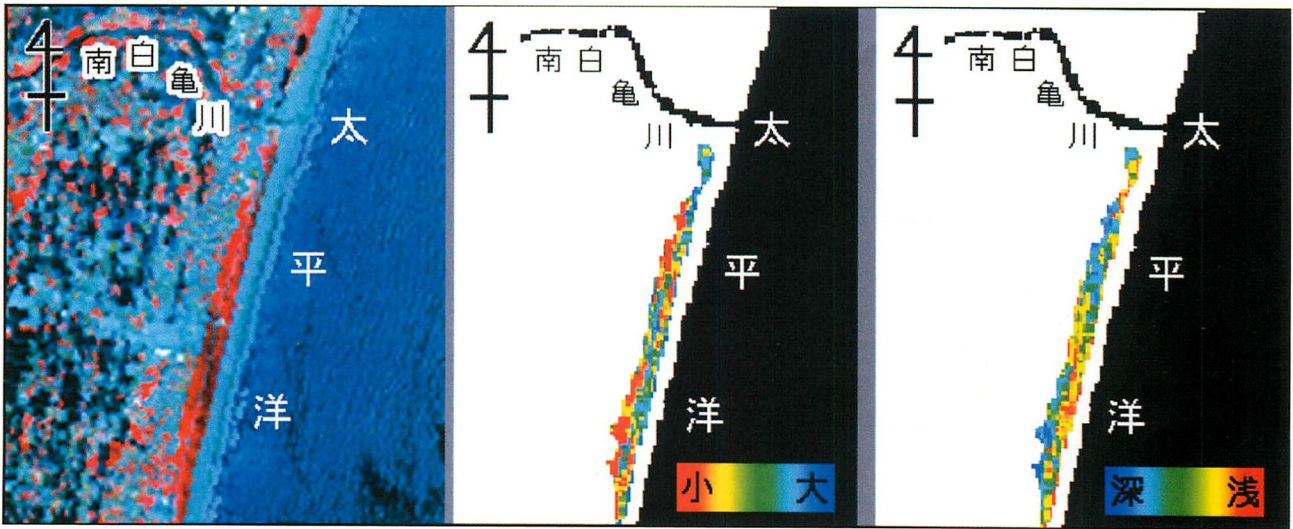
画像(b)は(11)式を用いたランドサット/TMデータの四則演算処理とシュードカラー表示処理によって作成したクロマツ葉の比葉面積を媒介として判読した生育状態の評価画像で，青～緑の色変化が生長量の小～大に対応している。

画像(c)は(12)式を用いたランドサット/TMデータの四則演算処理とシュードカラー表示処理によって作成したクロマツ葉の光学特性を媒介として判読した地下水分布の評価画像で，青～緑の色変化が地下水深の深～浅に対応している。

(2) 判読結果のまとめ

衛星データの画像処理によって判読した九十九里海岸林の地下水環境は，以下のように判読できる。

- ・赤～黄域で示される地下水深の浅い個所が中央部に分布し，緑～青域で示される地下水深の深い個所が北部(画像上部)と南部(画像下部)の陸側部に分布している。
- ・赤域で示される地下水深の浅い個所が海側に点在している。
- ・SLAと地下水深の分布画像を比較すると，地下水深の浅い個所(赤～黄域)と生長量が低い個所(緑～青域)とが一致していることが確認できる。この現象は，九十九里海岸林における地下水位に起因する過湿と根系の枯死および集団枯損との関連を研究した結果¹⁴⁾と一致している。



(a) フォールスカラー (b) 生育状態評価画像 (c) 地下水深評価画像

画像-3 衛星画像で判読した九十九里海岸林の状態

4. 総 括

本研究は房総半島のクロマツ海岸林を対象に、現地で採集したクロマツ葉の光学特性に関する生育状態および地下水環境について現地調査データの回帰分析によって確認するとともに、その結果に基づいた衛星データの画像処理によってクロマツ海岸林の生育状態と地下水環境を判読した。本研究で明らかにした事象をまとめると、以下のとおりである。

(1) クロマツ葉の生育状態の指標と定義した比葉面積の変動に対して、可視光緑波長域反射率(VG)と植生指標(NDVI)によって数量化したスペクトル指標が最も高い相関性を示すことを確認した。

(2) クロマツ海岸林が立地する土壌における地下水深の差異に対して、可視光緑反射率(VG)、可視光赤反射率(VR)および植生指標(NIR)によって数量化したスペクトル指標が最も高い相関性を示すことを確認した。

(3) $[-1.771(B2)-217.588(NDVI)+202.239]$ で算定されるランドサットデータのスペクトル指標を用いた画像処理によって、房総半島に分布するクロマツ海岸林の生育状態の違いを可視化した衛星画像を作成した。この衛星画像から、九十九里浜および富津岬の海岸林の生育量が他の海岸林にくらべて低いことを判読し、地下水に起因した過湿化による影響を確認した。

(4) $[-0.028(B2)-0.037(B3)+0.057(B4)-2.417]$ で算定されるランドサットデータのスペクトル指標を用いた画像処理によって、九十九里海岸林における地下水深分布を可視化した衛星画像を作成した。この衛星画像から、地下水深の浅い個所は、上部北側のほぼ全域、下部南側の有料道路を境にした西側に分布している。また、画像が小さいために判別し難いが、局所的な地下水深の浅い個所が分布している様子が視認できる。さらに、地下水深が浅い個所では生長量が低いことが確認できた。

本研究では、林地土壌における地下水の挙動を海岸林が示す光学特性を媒介として判読している。この判読法は、植物生態系と地球環境との関係を空間分布、生態的立地、歴史的変遷のそれぞれの面から扱う地植物学的手法¹⁵⁾を応用したものであり、衛星リモートセンシングにおける新しい試みである。衛星データを利用した地植物学的手法は林地土壌の水分特性だけではなく、根系の発達状態に関わる

有効土層の厚さなどの理学的性質の判読にも利用されており¹⁶⁾、土地改変や地下水環境による海岸林の被害予測に対する新たな判読法の提案を今後の課題としたい。

引用文献

- [1] 千葉県：海岸保安林管理基本計画，pp.131-175，(1997)
- [2] (財)資源・環境観測解析センター：新編リモートセンシング用語辞典，pp.98，(1996)
- [3] (財)資源・環境観測解析センター：新編リモートセンシング用語辞典，pp.92，(1996)
- [4] American Society of Photogrammetry：MANUAL OF REMOTE SENSING，pp.548，(1983)
- [5] American Society of Photogrammetry：MANUAL OF REMOTE SENSING，pp.2136-2142，(1983)
- [6] 只木良也：森林の生態，共立出版，pp.66-90 (1983)
- [7] 田崎忠良：環境植物学，朝倉書店，pp.218 (1988)
- [8] 甲山隆司：植物生態学-Plant Ecology-，朝倉書店，pp.103-105，(2005)
- [9] 内田 治：すぐわかるEXCELによる他変量解析 東京図書，pp27-62，(1999)
- [10] 高木幹雄，下田陽久編：画像解析ハンドブック 東京大学出版会，pp.425-444，(1991)
- [11] 宇宙開発事業団・地球観測センター：地球観測データ利用ハンドブック，(財)リモートセンシングセンター，pp.6-1-6-12，(1982)
- [12] Gyanesh Chander, Brian Markham:Revised ランドサット5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges,ランドサット PROJECT,USGS，(2003)
- [13] 日本リモートセンシング研究会：画像の処理と解析 共立出版，pp.189-190，(1982)
- [14] 小田隆則：千葉県森林研究センター：海岸砂丘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(学位論文)，千葉県森林研究センター特別研究報告，第3号，pp.17，(2001)
- [15] (財)資源・環境観測解析センター：新編リモートセンシング用語辞典，pp.122，(1996)
- [16] 西川 肇・藤井壽生・工藤勝輝・露木延夫・近藤勉・田原達人：衛星データを利用した森林保水機能解析，土木学会論文集，No.706/VII-23/，77-85 (2002)

[受付 2005年12月28日，受理 2006年6月20日]