

3次元衛星画像を用いた海岸林の景観評価

工藤勝輝¹・西川 肇¹・藤井壽生¹・近田文弘²・朝香智仁³

Landscape evaluation for coastal forest using three-dimensional satellite images

Katsuteru Kudoh · Hajime Nishikawa · Hisao Fujii · Fumihiko Konta and Tomohito Asaka

Abstract : In the critical zones where these coastal forests are located, remote sensing technologies using satellites are an effective means of accumulating spatial data covering a wide area. Focusing on the Kujukuri coastal black pine forests on the Boso Peninsula in Chiba Prefecture, this study proposes a landscape assessment method for coastal forests that uses three-dimensional satellite images. A method in which high-resolution three-dimensional satellite images are utilized to determine the proper use of coastal forests was also studied.

1 はじめに

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で形成される白砂青松の松原は環境資源として重要な役割を果たしている。また、海岸林が立地する臨海部は工場生産の諸設備および基幹交通などを伴う大きな都市が集中し、土地利用極めて重要な地域でもある。農林水産省および国土交通省では臨海都市と調和した海岸の景観形成のガイドラインをとりまとめており(農林省・国土交通省, 2007)、環境省では人と海岸林が共生する臨海域を里海と定義し、その創生に向けて支援事業を進めている(環境省, 2008)。海岸林が立地する臨海域の広域にわたる面的情報を収集するには、衛星のリモートセンシング技術が有効な手段として期待される。しかしながら、海岸林の景観評価におけるリモートセンシング技術の研究はその緒についたばかりと言わざるを得ない。本研究は千葉県房総半島の太平洋岸白子町に立地する九十九里浜の海岸クロマツ林を対象に選定し、高分解能衛星画像(ALOS画像)および数値地表モデル(航空機搭載レーザープロファイラの数値地表モデル)の組合せによって作成した3次元表示衛星画像を利用した海岸林の景観評価手法を提案するとともに、3次元表示の衛星画像で判読した海岸林の景観について考察したものである。

2 研究方法

高分解能衛星画像と数値地表モデルの組合せで作成した3次元衛星画像を利用した海岸林の景観について、以下の手順で評価した。

(1) 高分解能衛星画像の作成

ALOS衛星のAVNIR-2センサーで観測した可視光～近赤外線分光反射率データおよびPRISMセンサーで

観測したパンシャープン画像を用いた画像解析によって、九十九里海岸林の地表面被覆状態および海岸クロマツ林の活性度を正規化植生指標(NDVI)で判読した3次元衛星画像を作成する。

(2) 数値地表モデルの正法格子点への変換

国土地理院提供の航空機搭載レーザープロファイラで得られるランダム地点の地表高を衛星画像の画素配列に回答したグリッド地点における地表高の変換処理によって、海岸林の数値地表モデルを作成する。

(3) 3次元衛星画像の作成

衛星データの3次元空間上の位置、地表を眺める視点と位置および投影面の幾何学な関係を基に、高分解能衛星画像と航空機搭載レーザープロファイラの数値地表モデルを利用した房総半島および九十九里海岸の3次元衛星画像を作成する。

(4) まとめ

本研究で提案した3次元表示の衛星画像を用いた海岸林の景観評価法の有用性を総括するとともに、今後の課題について記述する。

3 高分解能衛星画像の作成

本研究で使用した衛星データは、2008年4月1日観測のALOS/AVNIR-2およびPRISMデータである。

ALOS(Advanced Land Observing Satellite)衛星は、JAXAが2006年1月24日に打ち上げた陸域観測技術衛星である。ALOSに搭載されたAVNIR-2センサーは10mの空間分解能で可視～近赤外域波長域を4つのマルチバンドで観測しており、PRISMセンサーは2.5mの空間分解能で可視～近赤外域波長域を1つのパンクロマチックバンドで観測している。AVNIR-2とPRISMセンサーが同時観測した場合には、パンシャープン処理により空間分解能(2.5m)のマルチバンド画像を得ることができる。2008年4月1日に千葉県を観測したALOSデータはAVNIR-2とPRISMセンサーで同時観測を実施しているため、これを活用してパンシャープン処理した衛星画像を作成することにした。パンシャープン処理を実施するにあたっては、AVNIR-2およびPRISMデータが1画素以内の地理座標誤差でマッチングするように双方のデータに対してオルソ幾何補正を施した。なおオルソ幾何補正の際に参照した地形図は、UTM座標系54帯の国土地理院発行1:25000数値地図図である。本研究で

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 国立科学博物館名誉研究員, Honorary Fellow, National Science Museum, 4-1-1 Amakubo, Tsukuba, 305-0005 Japan

³ 日本大学生産工学部助手, Research Associate, Faculty of College of Industrial Technology, Nihon University, 1-2-1 Izumi, Narashino, Chiba, 275-8575 Japan

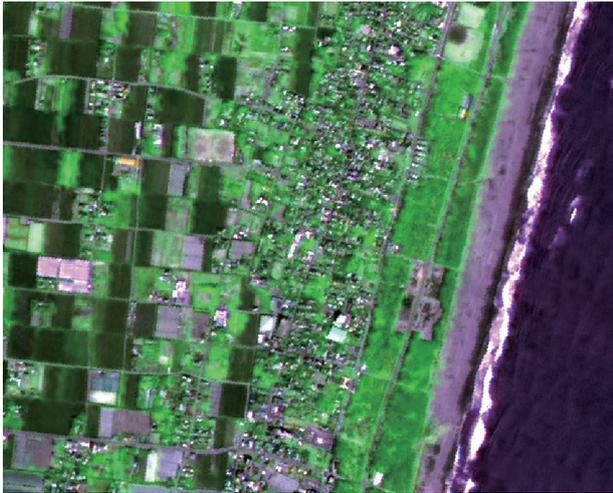


図 1：九十九里海岸の ALOS パンシャープン画像

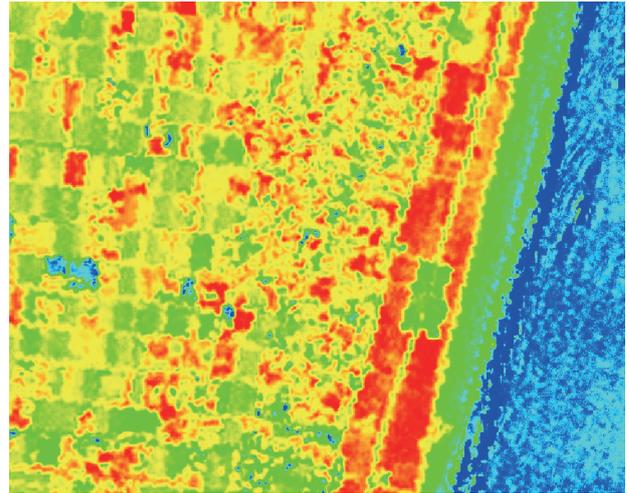


図 2：九十九里海岸の NDVI 分布画像

行ったパンシャープン処理は、オルソ幾何補正済みのデータに対して主成分の双方向変換によって実施した(Welch.R et al, 1987).

3.1 カラー合成画像の作成

カラー合成画像は、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・赤色を割当てて合成し、画像間の総対関係を色の変化に変換して画像出力する処理で作成される。この処理によって地表被覆状態の違いがその分光反射特性に基づく色調の違いで強調されて画像出力されるので、必要とする情報の識別が容易になる特徴を有する。

図 1 は ALOS の AVNIR-2/Band-2,3,4 データに青・赤・緑色を割り当ててカラー合成処理で作成した九十九里海岸林の ALOS パンシャープン画像である。この処理によって得られる衛星画像は他の地表面被覆より高い反射を示す近赤外線波長域に緑を与えているので植生が自然の色(ナチュラルカラー)に見られ、人間の眼では識別できない植生の種類や生育状態などの違いを微妙な色調の変化で表現している。

3.2 NDVI 分布画像の作成

生きた植物の葉の電磁波の分光反射特性は、可視赤波長域ではクロロフィルの吸収によって低く、近赤外波長域では葉肉内の多重散乱によって高くなるため、植物体が吸収する光合成有効放射に密接に結びついている(久世ら, 2005)。この特性を利用して数量化した植生指標は、主に光学センサで観測された可視赤波長域データと近赤外波長域データを用いて算出される NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)で、植生の葉量の多少や成長活力の判別に利用されている。NDVI はリモートセンシングの分野では代表的な植生指標であり、下記の式で算定される(Rouse et al, 1974)。

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

ここに、 ρ_{nir} ：近赤外波長域の反射率、 ρ_{red} ：可視

赤波長域の反射率である。植生域の NDVI 情報を衛星データから抽出・可視化して画像化する操作は、画像間演算処理という画像解析が用いられる。画像間演算処理は、互いに関連を持った観測波長帯の異なる複数の画像データ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(高木, 1991)。

図 2 は、ALOS/AVNIR-2 が観測した Band-3(可視赤波長域)と Band-4(近赤外波長域)データの画像間演算処理で作成した九十九里海岸林の NDVI 分布のパンシャープン画像である。この画像は NDVI の大きさを紫～赤色が連続的に変化するシュードカラーで表示しており、赤に近づく個所ほど NDVI が大きくなり、活性度が高い林分であることを示している。

4 本研究で使用した数値地表モデル

本研究で使用した数値地表モデル(DSM:Digital Surface Model)は、国土地理院が実施した航空機搭載レーザープロファイラを用いた航空レーザー測量によって得られたオリジナルデータから作成した。航空レーザー測量は航空機に搭載したレーザスキャナから地上にレーザー光を照射し、地上から反射するレーザー光との時間差より得られる地上までの距離と GPS 測量機、IMU (慣性計測装置) から得られる航空機の位置情報によって、地上の標高や地形を精密に調べる新しい測量方法である。レーザー光は 1 秒間に 50,000～100,000 回発射するため、おおよそ地表で 50～60cm 間隔での計測を実現することができるが、計測点のレーザスポットは点ではなく円形連続したランダム点であるため、面的に連続しない点も存在する。またレーザー光は樹木や地表面で反射するために、樹木等の最初に反射してくるファーストパルス、地表面で最後に反射するものをラストパルス、その間で反射するものをアザーパルスとしてそれぞれの高さを検出できるため、オリジナルデータからは必要なデータだけを取り出す処理が不可欠になる。DSM を作成するにあたっては、まずオリジナルデータから地表面高さの値だけを抽出する

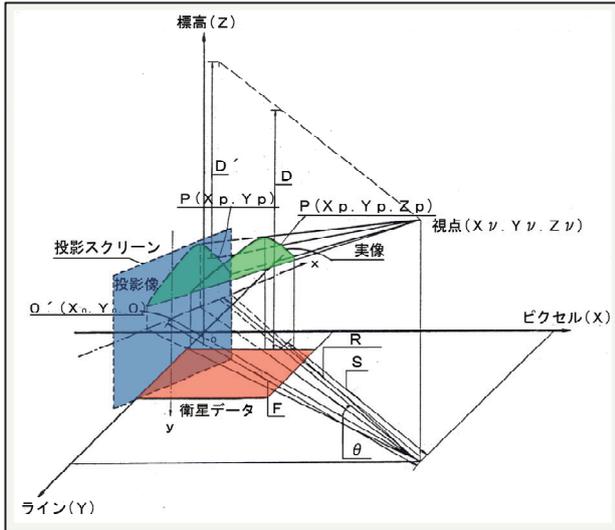


図 3 : 三次元表示画像における投影面のイメージ

ために、平面直角座標で 1m×1m の範囲毎に収まっているデータの最大値を地表面高さとして仮定し、第一段階の DSM 画像を作成した。第一段階の DSM 画像は画像の所々に欠損値が存在しており、この部分を補う目的とさらに画像のエッジ部分を残しながらノイズ部分を平滑化するため、メディアンフィルタを施したデータを最終的に本研究で使用する DSM 画像とした。

5 本研究で使用した数値地表モデル

国土を表現する最も基本的な方法は、地図を描画することであった。これまで、私たちは紙に書かれた地図から国土の姿を捉えてきた。一方、最近の衛星リモートセンシングでは、高分解能の衛星画像と数値地表モデルを用いて作成した 3 次元衛星画像によって国土の局所的な景観評価が行なわれるようになった。本研究で使用した高分解能 3 次元衛星画像の作成ソフトおよび作成された九十九里海岸林の 3 次元表示衛星は、以下のとおりである。

5.1 3次元衛星画像の作成ソフト

3次元表示画像は任意の点の3次元座標値を画像平面座標に直立する投影面に投影し、その2次元座標を求めることによって作成される(田中ら, 1985)。衛星画像の3次元表示は、衛星データの3次元空間上での位置、地表面高さを眺める視点と位置および投影面の配置を与え、地表面高さ・視点・投影面の三者の幾何学的な関係を設定した後、衛星データを3次元空間の投影面上に写像して作成される。

図3は、3次元空間における衛星画像の投影面を模式的に示した。視点の座標(X_v, Y_v, Z_v)、投影スクリーンの原点座標($X_0, Y_0, 0$)、透視しようとする観測点座標(X_p, Y_p, Z_p)としたときの任意の点の2次元座標などについては、以下の手順で導かれる(杉村ら, 1985)。

図4は、3次元衛星画像の作成プログラムのフローチャートを示した。以下の①～⑦は、3次元衛星画像の作成プログラムのフローに関わる理論式である。

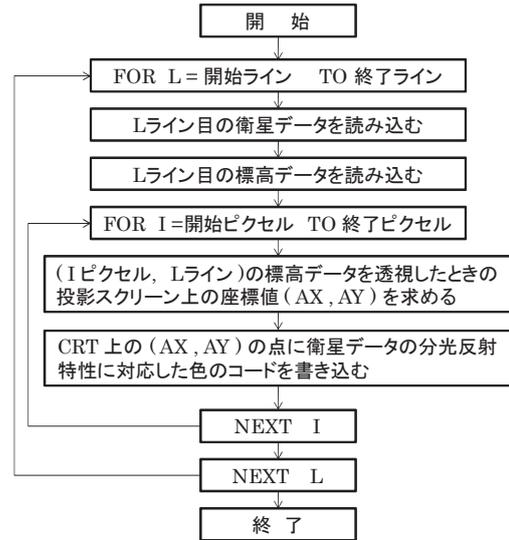


図 4 : 3次元表示画像作成プログラムのフロー

なお、図中の $I \cdot L$ は衛星画像のピクセルの座標、CRT は投影スクリーン、 $AX \cdot AY$ は投影スクリーン上の座標である。

① 視点と投影スクリーンの水平距離(F):

$$F = \{(X_v - X_0)^2 + (Y_v - Y_0)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

② 視点と観測点との水平距離(S):

$$S = \{(X_v - X_p)^2 + (Y_v - Y_p)^2\}^{1/2} \quad (3)$$

③ 視点と観測点との高低差(D):

$$D = Z_v - Z_p \quad (4)$$

④ 視点と観測点を結ぶ線分がなす水平角(θ):

$$\theta = \text{atan}\{(Y_v - Y_0)/(X_v - X_0)\} - \text{atan}\{(Y_v - Y_p)/(X_v - X_p)\} \quad (5)$$

⑤ 視点および視点と観測点を結ぶ線分の延長線がスクリーンと交わる点の水平距離(R):

$$R = F / \cos\theta \quad (6)$$

⑥ 視点と投影面上に投影された観測点との高低差(D'):

$$D' = D \cdot R / S \quad (7)$$

⑦ 投影面上に投影された観測点の座標値(x_p, y_p):

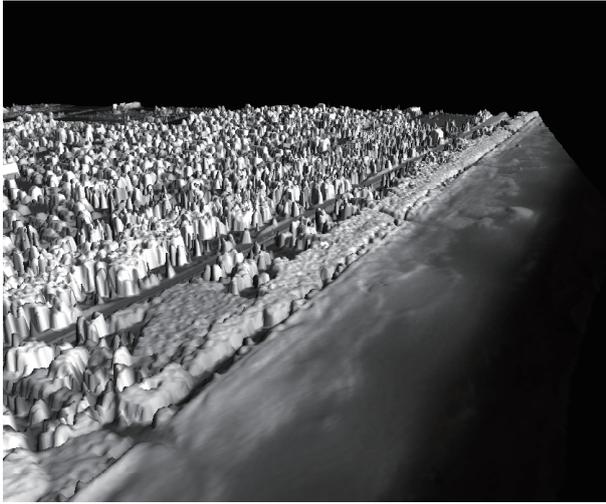
$$x_p = F \tan\theta, \quad y_p = Z + D' \quad (8)$$

5.2 九十九里海岸林の 3 次元衛星画像

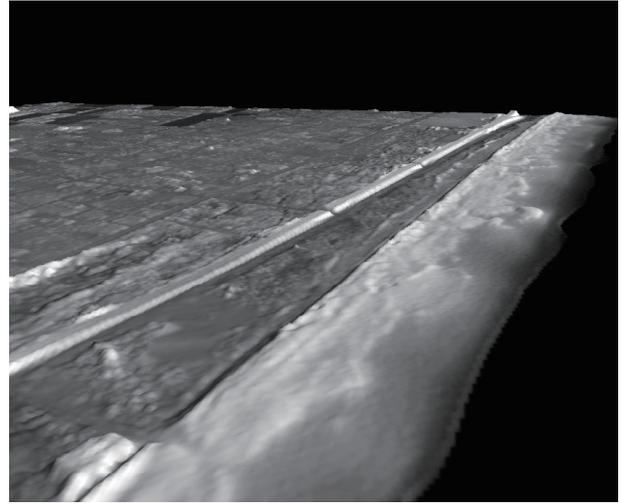
地表面を俯瞰する視点と位置を変えて、(1) 海域から俯瞰した九十九里海岸林、(2) 後背地から俯瞰した九十九里海岸林、(3) 海岸林の生育状態を俯瞰した九十九里海岸林、などの 3 次元衛星画像を作成した。

5.2.1 数値地表モデルの 3 次元表示画像

図 5(a) は航空機レーザープロファイラの DSM データ、図 5(b) は航空機レーザープロファイラの数値標高モデル (DEM : Digital Elevation Model) データを用いて、視点を千葉県長生郡の九十九里有料道路長生インター付近の海岸上空 100m に設定し、視野角 50



(a) 九十九里海岸林の3次元DSM画像



(b) 九十九里海岸林の3次元DEM画像

図5: 航空機レーザープロファイラの3次元表示画像

度、俯角 25 度、方位角 348 度で俯瞰した九十九里海岸の 3 次元表示画像を示した。なお、画像の立体感を強調するため、地表高を 3 倍にして 3 次元表示してある。DEM 画像に見られる斜めに走る白色直線部は、九十九里海岸林の中央部を縦断している高架の有料道路である。

5.2.2 海側から俯瞰した海岸林の 3 次元衛星画像

図 6 は、地表面被覆状態の ALOS パンシャープン画像(図 1 参照)と航空機レーザープロファイラの DSM 画像(図 5(a)参照)を用い、視点を千葉県長生郡の九十九里有料道路長生インター付近の海岸上空 100m に設定した 3 次元表示処理によって、視野角 50 度、俯角 25 度、方位角 348 度、地表高 3 倍で俯瞰した九十九里海岸の 3 次元衛星画像を示した。画像から、林帯の中央縦断する九十九里有料道路から海岸よりの林帯は樹高が低く、立木密度の高い低木の林分、後背地側の林帯は樹高が高く一本一本の樹木が見られるような立木密度の低い林分が分布している様子を明瞭に判読できる。なお画像中央の紫色部は、最近実施された伐採跡地である。航空機レーザープロファイラの数値地表モデルと組み合わせで作成した 3 次元衛星画像は航空機から俯瞰した立体感豊かな景観を再現できることを示した。また航空機レーザープロファイラの数値地表モデルは高さ方向の観測精度は $\pm 15\text{cm}$ であるが、高さ方向の分解能は 1cm であることから、森林域の 3 次元衛星画像は樹高、林分の立木密度や活性度などの植生調査に役立つデータを提供できると思われる。

5.2.3 後背地から俯瞰した海岸林の 3 次元衛星画像

図 7 は、NDVI 分布の ALOS パンシャープン画像(図 1 参照)と航空機レーザープロファイラの DSM 画像(図 5(a)参照)を用い、視点を千葉県長生郡の九十九里有料道路長生インター付近の海岸上空 100m に設定し、視野角 50 度、俯角 25 度、方位角 32 度、地表高 3 倍で俯瞰した九十九里海岸の 3 次元衛星画像を示した。画像より、海側から後背地の林縁部にかけて樹高が増大する海岸林特有の林相、後背地に立ちのぼるように道路に沿って高木が林立する林縁部、

緑豊かな住宅地および広葉樹の庭園木が展開している後背地など、立体感豊かな海岸林を含む臨海部の景観が判読できる。また太陽光の入射方位角の関係で、前出の海側から見た 3 次元衛星画像に比べて暗い感じの画像となり、リアル感を持った景観に仕上がっている。

5.3 海岸林の生育状態を俯瞰した 3 次元衛星画像

図 8 は、シュードカラー表示の ALOS パンシャープン画像(図 1 参照)と航空機レーザープロファイラの DSM 画像(図 5(a)参照)を用い、視点を千葉県長生郡の九十九里有料道路長生インター付近の海岸上空 100m に設定し、視野角 50 度、俯角 25 度、方位角 348 度、地表高 3 倍で俯瞰した九十九里海岸林の 3 次元衛星画像を示した。

ALOS/AVNIR-2 が観測した Band-3(可視赤波長域)と Band-4(近赤外波長域)データから算定した NDVI のパンシャープン画像と航空機レーザープロファイラの数値地表モデルを用いて、海岸側から海岸林の活性度を俯瞰した 3 次元衛星画像を示した。

5.4 空撮映像による検証

写真 1 は、本研究で対象にした九十九里海岸を航空機から撮影できる限界高度約 350m から望遠レンズを用いて斜め方向から撮影した空撮写真である。撮影日は曇天であったためやや不鮮明な写真であるが、前出の 3 次元衛星画像(図 6 参照)の非常に有用性を検証することができた。設定した対象域をプロペラ機によって低空から視点を設定して撮影するのは非常に困難な作業であることから、視点の位置を自由に設定して作成できる 3 次元衛星画像の有用性を検証した。

6 まとめ

高分解能衛星画像と航空機レーザープロファイラの数値地表モデルから作成した 3 次元表示画像を用いた海岸林の景観評価手法に関する研究結果と考察を以下に記述する。

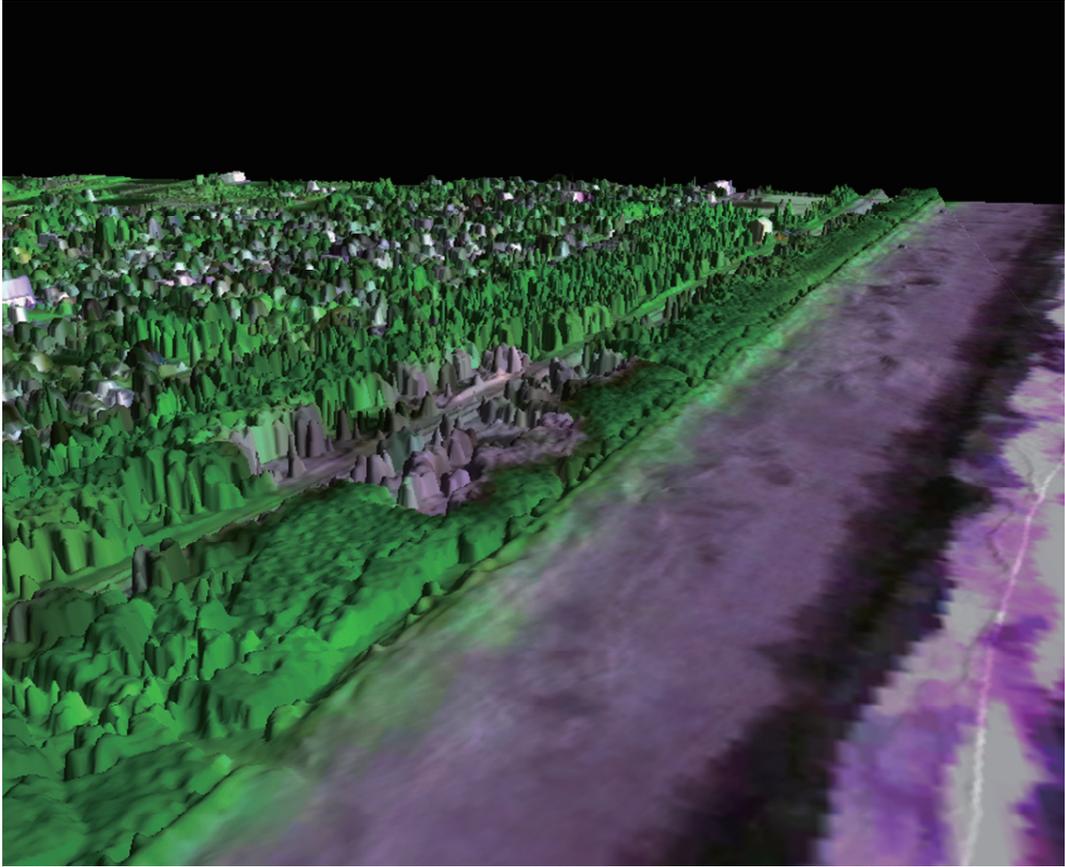


図 6 : 海岸から俯瞰した海岸林の 3 次元衛星画像

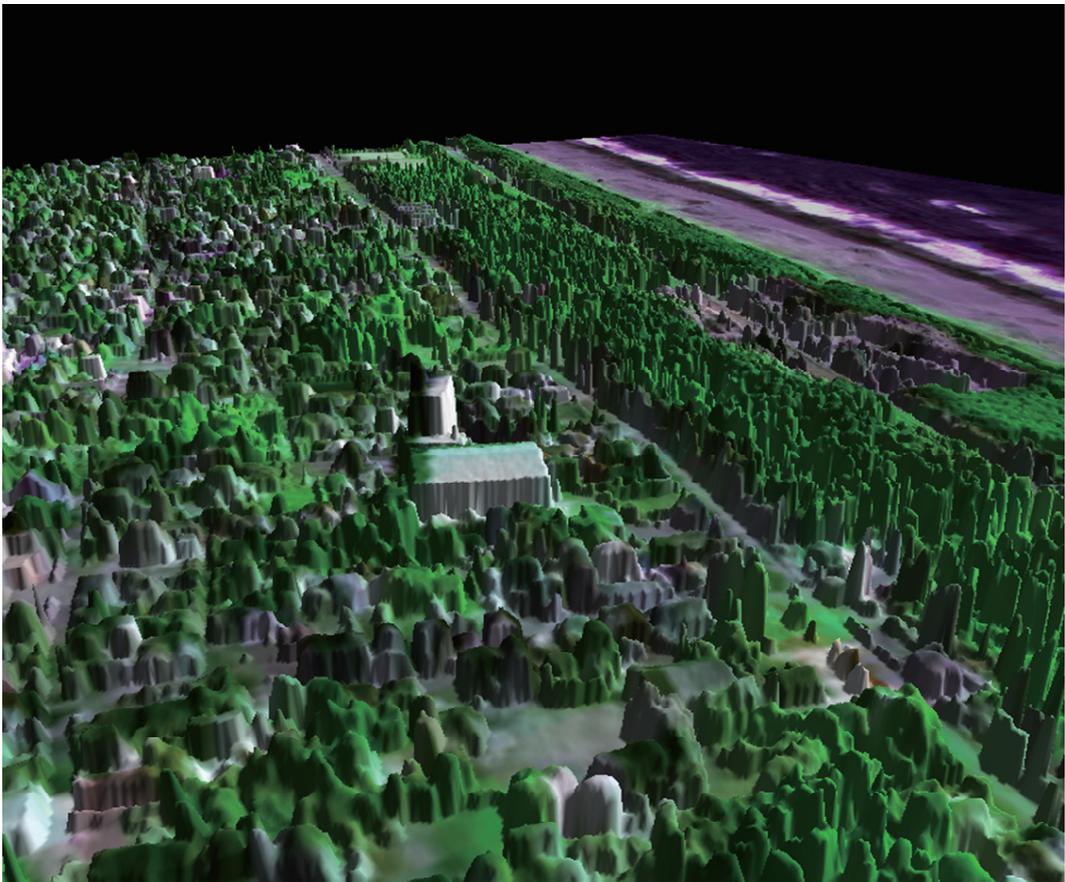


図 7 : 後背地側から俯瞰した九十九里海岸林の 3 次元衛星画像

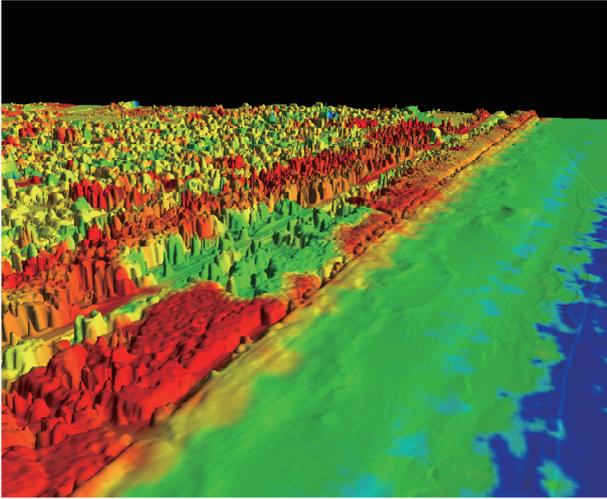


図 8 : 海岸林の生育状態を俯瞰した 3 次元衛星画像



写真 1 : 九十九里海岸林の空撮画像

(1) 航空機レーザープロファイラの DSM 画像は高さ方向の精度が 1cm と非常に高いために植生域のキャノピーが示す凹凸を明瞭に捉えている一方、DEM 画像の 3 次元表示画像はキャノピーの凹凸を捉えられないことから、航空機レーザープロファイラの DSM 画像が海岸林の景観を評価する上で有用なデータであることを確認した。

(2) 可視光～近赤外線波長域の衛星データから作成した分解能衛星画像と航空機レーザープロファイラ DSM 画像を用いた 3 次元表示処理で作成した海岸林の 3 次元衛星画像は、精緻な景観ができるだけではなく、植生域における個体ごとの樹高や活性度などの毎木調査へ活用できることを確認した。

(3) 低空に視点を設定して作成した海岸林の 3 次元衛星画像の有用性について、低空から空撮した海岸林の斜め写真によって検証した。

景観は、環境の要素として重視されるべき現代的な課題である。本研究で示したような俯瞰景観をシミュレーションする手法は有効であると考えられる。特に、航空写真と異なり、視点を自由に変化させることが大きな利点である。本研究では地表被覆の観点から解析を進めたが、今後は里海の観点から海岸林と景観との関係解析を研究課題として考えている。

謝辞： 航空機レーザー測量成果は、国土交通省国土地理院地理調査部社会地理課より提供していただいた「海岸における 3D 電子地図」に関する資料です。ここに記して、感謝の意を表します。

引用文献

- [1] 環境省(2008)：里海創生支援事業とは-里海の創世に向けて-。
- [2] 久世宏明，飯倉善和，竹内章司，吉森 久(2005)：リモートセンシングの基礎[第 2 版]，森北出版，pp.135-137。
- [3] 杉村俊郎，西川 肇，藤井壽生(1985)：ランドサット TM データから作成した 3 次元表示画像とその将来性，日本リモートセンシング学会，Vol.5, No.4, pp.85-90。
- [4] 高木 幹雄，下田 陽久(1991)：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，p.649。
- [5] 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，pp.130-134。
- [6] 農林水産省・国土交通省(2007)：海岸景観形成ガイドライン，利用と調和した海岸の形成の景観形成のあり方に関する検討委員会。
- [7] Rouse, J. W., Haas, R. H., Shell, J. A., Deering, D. W., Harlan, J.C.(1974)：Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *3rd Earth Remote Technology Satellite (ERTS) Symposium*, Vol.1, p.48-62。
- [8] Welch, R. and W. Ehlers(1987)：Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data, *Photogrammetric and Remote Sensing*, Vol.53(3), pp.301-303。

[受付 平成 21 年 3 月 16 日， 受理 平成 21 年 6 月 12 日]