

## 衛星データを用いた屋久島の環境モニタリング

石黒悦爾・下境田光徳

### 要 旨

森林における立木量の定期的な推定は二酸化炭素の吸収材としてますます重要性を増している。これまでの立木量の推定には、多大な労力、時間、危険と費用を伴ってきた。そこで、現地調査や定期的な調査が困難な屋久島の一部を解析対象地に選定し、30m x 30mのL-5/TMデータを用いた立木量の推定を試みた。解析指標として、大気補正処理を行っていないNDVI<sub>NC</sub>、大気補正処理を行ったNDVI<sub>AC</sub>と地形補正処理のB4<sub>GC</sub>を用い、現地調査データとの関連性を検討した。

キーワード：屋久島，リモートセンシング，ランドサット，立木量，環境モニタリング

ENVIRONMENTAL MONITORING ON YAKU ISLAND USING SATELLITE DATA

Etsuji ISHIGURO and Mitsunori SIMOSAKAIDA

### Abstract

As the Earth environment has been changing drastically, the development of monitoring technique has been become important and required. We focused to estimate the standing tree volumes because of that tree are absorption of carbon dioxide. For measuring the tree standing tree volume, ground truth and air photo has been used, traditionally. However former method was required huge human power and risks and latter method was very expensive and skill.

This study focused to develop the easy method to estimating these tree volumes using satellite data. Ground truth data and processed satellite image data were compared to clarify the accuracy.

Key words: Yaku island, Remote sensing, Landsat, Tree volume, Environmental monitoring.

### はじめに

近年、二酸化炭素濃度の増加による地球温暖化の問題が深刻に論議されている。森林は木材資源としてだけでなく、二酸化炭素の吸収体としての役割や国土保全・水源涵養などの環境保全に果たす機能が再認識されるなど森林に対しての捉え方が変化している。このような現況下で、森林における立木量の定期的な推定はますます重要性を増している。

立木量の推定には、実際、山林に入って胸高直径などの林分要素を測定する方法が用いられている。しかし、この方法では全ての樹木に対しての適用が不可能で、さらには人手を要するため、多大な労力・時間と危険を伴うという問題点を抱えている。また、航空写真を用いて冠径を測定し、これから立木量の推定を行う方法も用いられてはいるが、測定費用が高価で定期的な観測が困難であり、しかも写真の判読には熟練を要するなどの問題がある。人工衛星データは、航空写真に比べて空間分解能は劣るが、航空写真では利用で

きない近赤外・熱赤外などのデータも利用できる。また、同時に広範囲を測定し、時系列的な解析が可能である。

屋久島は、標高ならびに天候の変化も著しくしかも多様な植生の垂直分布が観測され、さらに外界からの影響が少ない閉鎖系という特質を持ち、世界自然遺産に登録されている貴重な地球資源である。これらの状況を背景に、本研究では、実地調査や定期的な調査が困難な屋久島を解析対象地として取り上げ、衛星データを用いた立木量の推定を試みた。

## 供試材料ならびに解析方法

### 供試材料

#### 1 解析対象地

解析対象地として選定した屋久島は、北緯30度28分、東経130度30分、鹿児島市から南方へ約135kmに位置するほぼ円形の島で、島面積はおよそ503km<sup>2</sup>、周囲約132km、東西約28km、南北約24kmである。この島は円錐形の地形をなしており、九州一の宮之浦岳（1,935m）をはじめ、1,000mを超える急峻な山々が40峰以上連なり、洋上アルプスとも呼ばれている島である。海岸線から山頂にかけて、亜熱帯、暖温帯、亜高山帯と変化に富んだ気候である。降水量は平地でも年間4,000mmに達する多雨地域である。山林にはスギをはじめ、モミ、ツガなどの針葉樹に加えて、多種の広葉樹が生育している。このような国有林の一部を解析対象地に選定した。

#### 2 供試衛星データ

屋久島は1年中雨の日が多く、また人工衛星データは雲の影響を受けやすいため、できる限り雲の影響の少ないデータを選択する必要がある。使用可能な衛星データとしてはLandsat/TM, SPOT/HRV, NOAA/AVHRR等が考えられるが、空間分解能、観測周期等を考慮して、Landsat-5/TM（以後、L-5/TMと略記）を使用することにした。

また、対象地域の季節的な変化ならびに経時的な変化を検討するため、以下の観測日のデータを使用した。

- |                |               |
|----------------|---------------|
| 1 : 1984年7月18日 | 2 : 1997年4月1日 |
| 3 : 1998年8月26日 | 4 : 2000年1月4日 |

#### 3 供試現地調査データ

解析に使用する衛星データ（1984年と1998年）の現地データとして九州森林管理局作成の森林調査簿〔1987年（昭和62年分）、2000年（平成13年分）〕を使用した。解析対象としての試験区は、屋久島全体から偏りなく抽出し、特別保護区、第1種特別地域、第2種特別地域、第3種特別地域に属する12林班とした。使用した林班における材積データを表1に示す。

### 解析方法

#### 1 幾何補正

人工衛星が撮影した画像には内部歪みと外部歪みに起因する幾何学的な歪みを生じる。ここで、内部歪みはセンサに起因するもので、光学カメラにおけるレンズ系やフィルムの平面性、スキャン速度や視野角の変動などがあげられる。また、外部歪みは対象物ならびに衛星に起因するもので、地表面の起伏、地球の曲率や衛星の高度、姿勢、速度の変動などによる影響である。

ERDAS IMAGINEのGround Control Point (GCP) Editor機能を用いて幾何補正を行った。まず、衛星データ画像および国土地理院発行の数値地図25,000(地図画像)を画面上に表示し、橋、道路などの構造物を目標に画像全体に偏りなく、画像基準点、地上基準点を選定した。

次に、入力した両座標値から座標変換行列を算出した。この時、変換後の画像誤差の計

算には、二乗平均誤差 (Root Mean Square Error: RMS Error) を用いた。

これらの作業を各々4つの衛星データに対して行った。この時、GCPは画像内で偏りなく40個以上選定し、Total RMS Errorが0.3pixel以下に、距離にすると9m(=0.3x30m)以下になるように設定した。

## 2 大気補正

真空中を伝播してきた太陽光エネルギーが大気圏内に入射する際に一部が大気によって反射される。ここで、大気圏に入射する際の反射エネルギーは、各バンドの電磁波強度の最小値(以下、ペDESTALと略記)と等しいと考えられる。そこでL-5/TMデータの大気補正として、LP( )を取り除くため、各バンドのペDESTAL値は幾何補正前のL-5/TMデータのヒストグラムから決定した。

表1 使用した林班における材積データ(1987)

林班	小班	林齢(年)	総材積(m <sup>3</sup> )	スギ材積(m <sup>3</sup> )	スギ割合(%)
22	い	270	23555.3	7773.2	0.33
22	ろ	260	35880.0	10046.4	0.28
22	は	260	22742.4	9551.8	0.42
231	い	160	34320.0	7893.6	0.23
267	い	160	62419.5	13732.2	0.22
228	い	150	104419.0	20883.8	0.20
263	い	160	35958.6	3595.8	0.10
104	い	155	61687.5	4318.1	0.07
105	い	135	49727.5	3978.2	0.08
14	い	12	564.3	564.3	1.00
14	に	160	20860.0	1043.0	0.05
17	い	260	83645.1	50187.0	0.60
17	は	260	21697.2	13018.3	0.60
80	い	260	38082.0	20945.1	0.55
80	ほ	10	338.4	304.6	0.90
86	い	265	22550.0	12402.5	0.55
86	ろ	270	9252.0	2775.6	0.30
86	と	265	3426.5	1027.9	0.30
86	ち	270	10992.3	3297.6	0.30
101	い	56	6888.0	6199.2	0.90
101	ろ	54	19241.6	8273.8	0.43
101	ほ	51	4308.0	1723.2	0.40
101	へ	50	5895.7	3537.4	0.60

## 3 解析指標

### 1) : NDVI

植物の光合成は675nm前後の波長をクロロフィルが吸収している。また、近赤外域の波長帯は植物の水分量に関係することが確かめられている。一般に、植物の分光反射特性曲線は、400nmから700nmの可視領域では10~20%と低く、700nmから1,100nmの近赤外領域では40~70%と高い反射率を示すことが多い。このような特性を利用し、植生の有無・多少・活性度を示す種の植生指標が提唱されている。その中で最も広く利用されている植生指標は以下に示す正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)である。

この値が大きいほど植物量が多い、または活性度が高いといわれている。そこで、大気補正を行っていないデータによるNDV処理( $NDVI_{NC}$ )と大気補正を行ったデータを用いたNDVI処理( $NDVI_{AC}$ )を行い、現地調査結果と比較した。

2) :  $B4_{GC}$

大気効果や地形効果の簡易的な除去法の一例として、古海ら<sup>3)</sup>はパターン展開法を提唱している。これは、L-5/TMの7バンドの内、空間分解能が異なるBand 6を除いた6つのバンドの情報を植生 - 土壌 - 水の3成分で表示し、解析する手法である。この方法を昨年度屋久島に適用したが、 $NDVI_{NC}$ とほとんど同じ相関となった。この解析において、L-5/TMの各バンドの和は、地形的な影響を取り除くことが示されたので、各バンドの和と植物の水分量に関するBand4の比を新たな解析指標( $B4_{GC}$ )とした。ここで、分母には全バンドの代わりにBand2 + Band3 + Band4を用いた。

$$B4_{GC} = B4 / (B2 + B3 + B4)$$

この時の各バンドのデータは、大気補正を行ったL-5/TMデータを用いた。また、上記のバンド間演算には、ERSDAC(Earth Remote Sensing Data Analysis Center)が作成した衛星画像解析ソフトNavigator、(以後E-Naviと略記)を用いた。

#### 4 解析結果の検証

衛星画像内で120m x 120m (4pixel x 4pixel)のプロットエリアを設定し、エリア内の平均輝度を求めた。このエリアを解析対象区域の林班内に数地点設定し、林班内の平均輝度とした。これらの処理はE-Naviで表示したプロットエリアを、Dibasのスクリーンキャプチャー機能を用いてPhotoshopに転送し、エリア内の平均輝度値を算出する手法を用いた。この時、森林調査簿と林班図の現地データを用いて位置合わせを行った。

このようにして算出した各指標の平均輝度値と森林調査簿に記載されているスギ材積と林齢との関係を、単回帰分析ならびに重回帰分析を行って種々の指標を用いて作成した画像の解析精度を検証した。

1) : 単回帰分析

目的変数にスギ材積を、説明変数に $B4_{GC}$ の平均輝度値を用いて単回帰分析を行った。

2) : 重回帰分析

目的変数にスギ材積を、説明変数にスギ林齢とNDVIなどの解析指標の平均輝度値を用いて重回帰分析を行った。

### 結果及び考察

#### 1 L-5/TMデータの幾何補正

観測日の異なる4つの衛星データを比較・解析するために幾何補正を行った。幾何補正後のL-5/TMデータを図1に示す。これらのL-5/TM画像は、Band2に青を、Band3に緑を、Band4に赤を割り当てたトゥルーカラー(true color)で表示した。

幾何補正前後で画面の傾斜が異なったのは、前者が衛星の進行方向に直交して撮影したのに対し、後者はUTM系の座標に一致させたからである。この結果、異なる観測日のデータでも、同一地上点の情報を比較することが可能となった。

全ての画像は画像全体で0.3pixel以下の誤差となり、実距離では9m(=0.3x30m)以下となることが確認された。さらに、数値地図画像と比較した結果、橋や道路、空港などが良く一致していた。

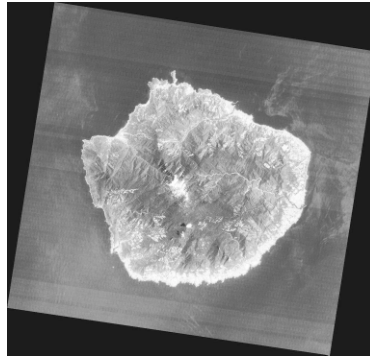


図1 L-5/TM幾何補正画像

## 2 L-5/TMデータの大気補正

大気圏内に入射する際に太陽光の一部が反射され、センサに入射する電磁波強度 $LP(\quad)$ を取り除く大気補正処理を行った。ここでペDESTAL値は、表2に示すように幾何補正前のL-5/TMデータのヒストグラムから決定した。

補正前後の画像は視覚的には顕著な違いは認められないが、NDVIなどのバンド間演算処理を行うと、この差異が明確になることが小野ら20)によって報告されている。

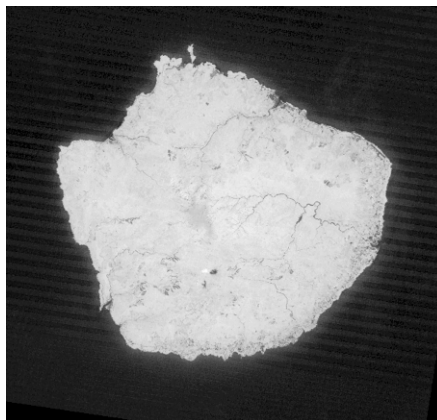
表2 ペDESTAL値

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1984/ 7 /18	72	24	19	12	6	105	2
1997/ 4 /01	54	15	13	5	1	104	1
1998/ 8 /26	56	17	13	6	1	98	1
2000/ 1 /04	38	11	9	5	1	89	1

## 3 解析指標

### 1) NDVI画像

NDVI画像は、道路や海、河川などの植生がない地点は黒く、植生がある地点は白く表示される。また、植生のある地点であっても濃淡の度合いによって、植物の活性度差が表示される。

図2 NDVI<sub>AC</sub>画像

されている．ここで、植生が存在する地域が黒く表示されているのは、方位や標高差により生じた影の影響や電磁波が透過できない雲の影響を受けていると推察される．

一般に、大気補正処理を行わないデータを用いてNDVI画像が作成されるが、屋久島のように標高差のある地域ではNDVI画像は地形の影響を受ける．そこで、大気補正処理を行ったデータを用いてNDVI画像を作成し、地形による影響を検討した．

同じ観測年月のNDVI画像をそれぞれ比較すると、大気補正処理を行った画像(NDVI<sub>AC</sub>)はNDVI<sub>NC</sub>画像よりも濃淡が顕著になり、植生の有無や活性度を明確に反映し、さらに、山肌などの地形の情報が取り除かれていることが確認された．

## 2) B4<sub>GC</sub>画像

B4<sub>GC</sub>画像は、NDVI画像と同様に植生が認められない地点は黒く、植生が認められる地点は白く表示される．また、植生が認められる地点であっても、濃淡の度合いによって、植物の活性度差が表されている．

各B4<sub>GC</sub>画像において、白黒の濃淡が顕著に示され、さらに、平面画像として表されたことから、大気効果または地形効果が取り除かれたことが確認された．

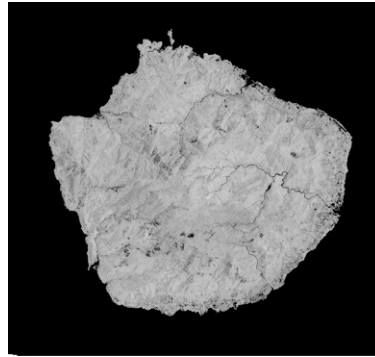


図3 B4<sub>GC</sub>画像

## 4 解析結果の検証

### 1) 単回帰分析

スギ材積を目的変数、各B4<sub>GC</sub>を説明変数として単回帰分析を行った．各観測日によるB4<sub>GC</sub>とスギ材積の関係を検討すると、各観測日ともB4<sub>GC</sub>とスギ材積の相関が極めて低く、L-5/TMデータにおいて季節的な関係を見出すまでには至らなかった．

また、スギ材積の年次変動を無視し、同じ季節(1984,1998)の平均輝度値との関係を検討した．スギ材積(1987-2000)を目的変数、各解析指標(B4<sub>GC</sub>,NDVI<sub>AC</sub>,NDVI<sub>NC</sub>)を説明変数として単回帰分析を行った．各解析指標とスギ材積との相関は、極めて低い値を示し、満足する関係は得られなかった．

### 2) 重回帰分析

スギ材積と各解析指標の関係を単回帰分析した結果、高い相関を得ることができなかった．一方、スギ材積量とスギの林齢には何らかの関係があると考え、スギ材積量の推定に林齢を取り入れた解析を行った．そこで、スギ材積を目的変数、各観測日によるB4<sub>GC</sub>と林齢を説明変数とした重回帰分析を行った．これらの結果は、いずれの観測日についても高い相関を示さなかった．しかしながら、単回帰分析では相関係数が0.0001から0.0453であったのに対し、重回帰分析では相関係数が0.2622から0.3338となり、いずれも相関が高くなった．

ここで、相関が低かったのは1984年(夏)のL-5/TMと1987年の現地データであった．1997年(春)、1998年(夏)と2000年(冬)のL-5/TMと2000年の現地データでは、2000年の組み合わせ

せが最も高い相関を示した。解析指標は樹木の活性度に影響を受けるため、指標値は夏が最も高い値を示した。この季節による指標値の変化は、NDVI値が季節により変動し、夏に最も高い値となるとの報告とも一致している。しかしながら、本解析結果は、指標値が高い値であることよりも観測月日と現地データとのタイムラグがより重要であり、樹木のような永年植物に対しても衛星の観測に同期した地上データの取得が必要であることを再確認することとなった。

また、単回帰分析の場合と同様にスギ材積の年次変動を無視し、同じ季節の1984と1998のL-5/TMデータにより算出した各解析指標 ( $B4_{GC}$ ,  $NDVI_{AC}$ ,  $NDVI_{NC}$ ) と林齢を説明変数とし、スギ材積を目的変数とした重回帰分析を行った。単回帰分析では相関係数が0.0036から0.0075であったのに対し、重回帰分析では相関係数が0.2540から0.2740となり、いずれも相関が高くなった。ここで、相関が最も低かったのは  $NDVI_{NC}$  であり、次いで  $NDVI_{AC}$  と  $B4_{GC}$  となった。このことからL-5/TMデータには大気の影響が大きく作用されることが明らかとなり、大気補正の重要性が再確認された。また、 $NDVI_{AC}$  と  $B4_{GC}$  の相関係数にほとんど差異が認められなかったことより、 $B4_{GC}$  による地形補正に問題を残した。

## 総 括

地球環境において森林は、様々な役割を果たしている。ゆえに、森林における立木量の定期的な推定により、森林の状態を把握することは重要である。しかしながら、これまでの立木量の推定には、多大な労力、時間、危険と費用を伴ってきた。そこで、現地調査や定期的な調査が困難な屋久島の一部を解析対象地に選定し、30m x 30mのL-5/TMデータを用いた立木量の推定を試みた。解析指標として、大気補正処理を行っていない  $NDVI_{NC}$ 、大気補正処理を行った  $NDVI_{AC}$  と地形補正処理の  $B4_{GC}$  を用い、現地調査データとの関連性を検討し、以下の結果を得た。

1. 解析指標値はNDVI値と同様に季節により変動し、夏に最も高い値となった。
2. 解析指標値が高い値であることよりも観測月日と現地データとのタイムラグがより重要であり、樹木のような永年植物に対しても衛星の観測に同期した地上データ取得の必要性が示された。
3. 単回帰分析：各解析指標とスギ材積との相関は極めて低い値を示した。
4. 重回帰分析：単回帰分析よりも高い相関を示したが、実用に供するまでには至らなかった。これらの原因としては、解析対象区域内には様々な植生が存在することや標高差による地形の影響を完全に取り除くことができなかったことが挙げられる。
5. L-5/TMデータには大気の影響が大きく作用されることが明らかとなり、大気補正の重要性が再確認された。
6.  $NDVI_{AC}$  と  $B4_{GC}$  の相関係数にほとんど差異が認められなかったことより、 $B4_{GC}$  による地形補正に問題を残した。

今後は地表分解能が1m x 1mであるIKONOSのような高解像度の衛星データの使用、解析対象区域の増加、同期した地上調査等を行う必要があると考えられる。また、標高差のある屋久島では、地形の影響を如何に抑えることができるかが今後の課題であり、植物の特性や地理情報などを折り込んだ多角的解析が必要であると考えられる。

## 謝 辞

現地データの提供を賜りました屋久島営林署の皆様へ深く感謝いたします。

衛星データ解析において使用したパーソナルコンピュータおよびERDAS IMAGINEは京都大学大学院農業研究科の鳥井清司先生の文部省科学研究費基盤研究「土地利用高度化

に伴う大規模灌漑地域の長期経年変化の解析・評価について」の共同研究によってご提供頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 文 献

1. 日本リモートセンシング研究会：図解リモートセンシング．社会法人日本測量協会．(1992)
2. 日本リモートセンシング研究会：わかりやすいリモートセンシングと地理情報システム．宇宙開発事業団．(1996)
3. 古海 忍・林 礼美・塩野由美子・村松加奈子・藤原 昇：Landsat/MSS, TM データを使ったパターン展開法による関西地域の植生解析．日本リモートセンシング学会誌．17(4)34 - 39 (1997)
4. 林 礼美・古海 忍・村松加奈子・藤原 昇：パターン展開法による水田解析．日本リモートセンシング学会誌．17(2)5 - 18 (1997)
5. 中園悦子・沢田治雄・永谷 泉：Landsat TM 画像による天然ヒノキの幹材積の推定．日本リモートセンシング学会第27回学術講演会論文集．71 - 72 (1999 / 11)
6. 永谷 泉・沢田治雄：衛星データを用いた森林多用度評価法の開発．日本リモートセンシング学会27回学術講演会論文集．241 - 242 (1999 / 11)
7. 高橋裕一・川島茂人：人工衛星画像を利用したスギ森林分布図の作成．日本リモートセンシング学会27回学術講演会論文集．249 - 250 (1999 / 11)
8. 小野朗子・藤原 昇：マツなどの樹木枯損動態の把握を目的としたパターン展開法の応用．日本リモートセンシング学会誌．22(1)：22 - 23 (2002)