

# 屋久島における時系列的なリモートセンシングデータ を利用した植生の空間解析

古谷透

筑波大学環境科学研究科

## 1. はじめに

現在、屋久島では中国大陸で生成された酸性物質が乾燥沈着しており(長淵, 2000)、人為的な汚染物質の放出が少ないにも関わらず、降水の平均的pHは4.6から4.7である(Satake, 1998)と報告されている。また屋久島の大部分を構成している花崗岩が酸性化に対する緩衝作用を弱くしている(Nakano *et al.*, 2001)など酸性化による植生への影響が危惧されている。また現在までに幾つかの記事で屋久島の植生の衰退が報告されてきた。国連環境計画によると屋久島は生物地理的には北帯植物界と旧熱帯植物界の境界に位置している。また屋久島を南限とする200種類もの固有植物種が生息しており、標高約2,000mまでの植生の鉛直分布は日本列島だけでなく東アジアにおいて最高である(UNEP, 2001)。国連環境計画が指摘するように屋久島には貴重な生態系が残されており、1993年には世界自然遺産にも登録された。現存する天然林を保存するためにも包括的な植生の解析が必要であると考えられる。

本研究の目的は1)屋久島における近年の植生状態を衛星データを用いたリモートセンシングと地理情報システム的手法を利用して解析し、植生状態の時空間的な変動を明らかにする事、また2)その解析結果を基に植生状態の時空間的な変動の原因を検討する事である。

## 2. 調査対象地域

鹿児島県の屋久島全域に対して調査、解析を行った。屋久島は東経130°25'–130°42'、北緯30°13'–30°28'、九州本土最南端の佐多岬から南方約70km、東京から約1,000km、中国大陸から東方約800kmに位置している。屋久島は周囲132km、面積503km<sup>2</sup>、東西28km、南北24kmでほぼ円形の形をしており、霧島・屋久国立公園の一部である。屋久島は霧島・屋久国立公園の54,833haを占めており、10,747

haの屋久島世界自然遺産指定地域、19,000haの屋久島生物圏保存地域、1,219haの屋久島原生地域、14,600haの森林生態系保護地域を含んでいる。屋久島の土地の96%は政府により所有され、残りの4%は個人により所有されている。

## 3. 調査対象地域の植生

屋久島には多様な植生が生息している。海岸地域には半熱帯植物であるガジュマル(*Ficus superba* var. *japonica*)が生息し、半熱帯から温帯植物であるタブノキ(*Machilus thunbergii*)やツブラジイ(*Castanopsis cuspidate*)、常緑性のカシが内陸部に生息している。温帯植物としてモミやヤマグルマ(*Trochodendron aralioides*)、半高山帯植物としてチャボヤクシマダケ(*Pseudosasa owatarii*)、ウスゲヤクシマシャクナゲ(*Rhododendron degronianum* var. *yakushimanum*)などの植物が生息しており、半熱帯植物から半高山帯植物が植生の鉛直分布を構成している。また屋久島には数千年の樹齢を誇る巨大なヤクスギが生息している(Ministry of Environment, no date)。屋久島の植生は日本本土の植生とは非常に異なり屋久島特有の生態系を形成している。例えば、日本本土の自然植生であるブナ(*Fagus crenata*)は屋久島には生息しない(Ministry of Environment, no date)。屋久島には94種類の植物の固有種が生息し、200種類もの植物が屋久島を南限とし、その他多くの植物が屋久島を北限としている。図1は環境省によって作成された屋久島の植生図である。この植生図の基になった植生調査は1979年、1983年から1986年にかけて現地調査と航空写真判読を用いて行われた。この植生図は本来、29クラスに分類されていたが、本研究ではそれらのクラスを代表的な7クラスに再分類し、半高山帯地域のササ・タケ群落(sub-alpine forest with bamboo and grass)、スギ天然林(evergreen coniferous old-growth forest with *C. japonica*)、

シイ・カシ萌芽林(evergreen oak and laurel coppice forest)、イスノキ・ウラジロガシ群集(evergreen broadleaf forest with *Q. salicina* and *D. racemosum*)、スギ・ヒノキ・サワラ植林(plantation forest of *C. japonica*, *C. obtusa*, and *C. pisifera*)、海岸植生(coastal lowland forest)、裸地(barren land)に分類した。

#### 4. 衛星データ

本研究では NOAA Advanced High Resolution Radiometer (AVHRR) と Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) の二種類の衛星データを用いて屋久島の植生の時空間的な特徴を解析した。

##### 4.1 NOAA AVHRR データ

アメリカ合衆国の The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA、アメリカ海洋大気庁) は地球観測衛星を運営している。最初の実用的な NOAA 衛星 (NOAA 6 号) は 1979 年に打ち上げられ、その後幾つもの NOAA 衛星が打ち上げられた。NOAA は AVHRR というセンサーを搭載している。AVHRR センサーは 4 個、あるいは 5 個 (衛星による) のバンドを持ち、電磁波の可視域、近赤外域、熱赤外域のスペクトルを観測している。NOAA 衛星は 1979 年から連続して地球表面の観測を続けており、日単位で全世界を観測している事からしばしば全球的な地球観測に用いられてきた。AVHRR データを用いる上で最も大きな問題は植生域上の雲の存在である (Moody and Strahler, 1994)。指定した地域のデータを日単位で得る事は可能であるが、雲が全くないデータを継続的に得る事はほとんど不可能である。この問題を解決するために Maximum Value Composite (MVC, 最大値を用いたコンポジット処理) が開発された (Holben, 1986)。本研究では MVC を用いて作成された NOAA AVHRR Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, 正規化植生指数) 10 日間コンポジットデータを用いた。MVC の手法を用いて NDVI コンポジットデータを作成するためには幾何補正された時系列データを用いて、ピクセルごとに NDVI の値を検査し、NDVI の最大の値がそのピクセルの値として用いられる。全てのピクセルの値が評価された後に最終的にコン

ポジット画像が作成される。この手法は雲の影響、方向性反射、太陽入射角、陰影、エアロゾル、水蒸気などの影響を軽減する (Holben, 1986)。この処理により不透明な雲は除去できるが、半透明な雲や霧が多い時期にはそれらの影響を完全には除去する事ができない。本研究の対象地域である屋久島は東部、南東部で特に降水量が高く、最も降水量が高いとされる荒川ダム周辺の年平均降水量は 7,373mm/yr である (高原、松本, 2002)。それゆえに、NOAA AVHRR NDVI 10 日間コンポジットデータから全ての気象影響を取り除く事は大変難しいと考えられる。しかしながら、本研究では MVC 処理によって作成された NDVI コンポジットデータは地球表面の NDVI の値に最も近い値を示しているという推測の下で解析を行った。

##### 4.2 Landsat ETM+データ

Landsat 7 衛星は ETM+センサーを搭載している。Landsat ETM+センサーは可視域の赤、緑、青の 3 バンド、中間赤外域に 2 バンド、近赤外域と熱赤外域に各 1 バンド、パンクロマティックバンドの計 8 つのバンドを持っている。可視域、近赤外域、中間赤外域の空間分解能は Landsat TM センサーのそれと同じく 30m である。しかしながら、Landsat TM センサーにおいて熱赤外バンドの空間分解能が 120m であったのに対して Landsat ETM+センサーでは 60m に向上した。本研究では 2001 年 3 月 19 日に撮られた屋久島全域を含む Landsat ETM+データを用いて植生分類を行った。本研究で用いた Landsat ETM+データの詳細は表 1 に示されている。

#### 5. 植生指数

現地調査を主体とした植生データの収集は費用、時間が掛かり、対象地域によっては不可能であるために、人工衛星や航空機によって撮られたマルチスペクトルデータが植生量や植生状態の解析に多く用いられている。現在までに様々な植生指数が開発されてきたが、その中でも Rouse *et al.* (1973) が開発した NDVI が一般的に最も多く用いられている。NDVI は対象物質の反射率  $\rho$  を用いて次の式によって定義する事ができる：

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

この式で nir は近赤外を示し、red は赤を示す。NDVI は第一次生産量(Tucker *et al.*, 1983)、葉面積指数 (LAI) (Spanner *et al.*, 1990)、植生被覆率(Townshend *et al.*, 1987)、バイオマスや光合成有効放射吸収量(PAR)(Goward *et al.*, 1991)に関係している。また NDVI は光合成、炭素収支、水収支やそれらと関係する地上プロセスの様々なモデルによって利用されている (Tucker and Sellers, 1986; Nemani and Running, 1989; Asrar, 1989)。NDVI は-1 から +1 で表示され、-0.2 から 0.05 は雪や水、砂漠、土壌を示し、0.05 から 0.7 は緑の植生を示している (Tucker *et al.*, 1986)。

NOAA AVHRR データでは NDVI はバンド 1 (赤) とバンド 2 (近赤外) を用いて次の式によって計算する事ができる:

$$NDVI(NOAA \text{ AVHRR}) = \frac{\text{Band2} - \text{Band1}}{\text{Band2} + \text{Band1}} \quad (2)$$

現在までに主に全球規模で NOAA AVHRR データを用いた NDVI の時系列解析が行われてきた。例えば、Myneni *et al.* (1997, 1998) は北緯 45° で NDVI の偏差が増加傾向にある事を確認した。その原因として 9 年間 (1981-1990) の期間で NDVI の季節変動が 10% 以上増加した事が確認され、同様の時期にアラスカのバローでは大気中の二酸化炭素の年変動が約 14% 増加していた。また Kawabata *et al.* (2001) と Ichii *et al.* (2002) は北半球、及び南半球の半乾燥地域で NDVI と気温、降水量の間に相互作用がある事を報告した。1982 年から 1990 年の間で北半球の中、高緯度で起こっている NDVI の増加は気温の上昇が関係しており、南半球の半乾燥地域で起こっている NDVI の減少は降水量の減少が関係している事を確認した。

## 6. 研究手法

本研究は NOAA AVHRR データを用いた NDVI の時系列解析と Landsat ETM+を用いた植生分類の二種類の解析により構成される。図 2 は研究手法を示す。図 2 の左側の部分は NOAA AVHRR データを用いた NDVI の時系列解析を示

している。この解析では NOAA AVHRR NDVI10 日間コンポジットデータを用いて 1994 年から 2002 年までの 8 年間の期間で屋久島全域に対して NDVI の時系列解析を行った。右側の部分は Landsat ETM+データを用いた植生分類を示している。この解析では 2001 年 3 月 19 日に撮られた Landsat ETM+データを用いて植生分類を行った。Landsat ETM+データを用いた植生分類では分類過程では補助データとして 1/25,000 地形図、数値標高モデル (DEM)、植生図、1977 年に撮られた空中写真を用いた。NOAA AVHRR データを用いた NDVI の時系列解析と Landsat ETM+データを用いた植生分類の結果を用いてオーバーレイ解析を行った。

屋久島を構成する全てのピクセルに対して NDVI の時系列グラフを作成した。NDVI の時系列グラフに対して季節性の分解を行った。NDVI の時系列グラフは季節成分、トレンド成分、不規則成分に分解され、トレンド成分と不規則成分を乗算する事によって一年以内の周期性を除去した NDVI の時系列グラフを作成した。この周期性を除去した NDVI の時系列グラフに対して線形の傾向式を求め、傾向式の統計的な有意性を確かめるために有意水準を 10% とした T 検定を行った。線形の傾向式の傾きを屋久島を構成する各ピクセルに代入し、屋久島における NDVI の変動傾向を示す画像を作成した。周期性の除去に関する詳しい説明は (6.1 周期性の除去) に示されている。

NOAA AVHRR NDVI10 日間コンポジットデータは MAFFIN-STDaB によりユニバーサル横メルカトル図法、ゾーン 52 north、楕円体 WGS 84 に設定された。NOAA AVHRR NDVI10 日間コンポジットデータと Landsat ETM+データの投影法を一致させるために Landsat ETM+データに対して幾何補正を行った。Landsat ETM+データは国土地理院により作成された 1/25,000 地形図を用いて、image-to-map geometric rectification の手法を用いて地形図の投影法であるユニバーサル横メルカトル図法、ゾーン 52 north、楕円体 Bessel に変換した。その後最近隣りサンプリング法を用いてユニバーサル横メルカトル図法、ゾーン 52 north、楕円体 WGS 84 に変換した。

山岳地域を撮ったデジタル画像は地形効果と呼ばれる放射量の歪みが生じる事がある。

地形効果は太陽と斜面の角度によって照度に変化する事によって起こり、画像の明度が変化する(ERDAS, 1999)。本研究の対象地域である屋久島は急峻な地形を持つ地域であり、衛星画像においても著しい地形効果が存在する。そこで地形効果を除去するために地形効果の補正を行った。本研究では Landsat ETM+データに対して Civco(1989)による地形効果の補正方法を適用した。数値標高モデルにより陰影図を作成し、地形効果補正の処理に用いた。

屋久島における各植生帯の分布と密度を解析するために、最尤分類法を用いた教師付き分類とサブピクセル分類を行った。最尤分類法を用いた教師付き分類は一般的なピクセル単位の分類手法の一つである。サブピクセル分類の処理において対象物質を含むピクセルを指定し、対象物質のスペクトルを抽出する必要があるが、対象物質を含むピクセルを抽出するために最尤分類法を用いた教師付き分類を行った。教師付き分類の結果に基づいて屋久島の主要な植生帯のスペクトルを抽出し、その植生帯に対してサブピクセル分類を行った。サブピクセル分類には ERDAS Imagine subpixel classifier™を用いた。サブピクセル分類に関する詳しい説明は(6.2 サブピクセル分類)に示されている。

各植生帯における NDVI の変動傾向を解析するために NDVI の変動傾向を示す画像とサブピクセル分類によって分類された各植生帯の分類画像を用いてオーバーレイ解析を行った。また NDVI の変動傾向を多角的に解析するために数値標高モデルや降水量、表流水 pH、表流水中のシリカ濃度を示すデータを用いてオーバーレイ解析を行った。

### 6.1 周期性の除去

植物の成長は気温、日照時間、降水量などの気象要因に最も依存していると考えられる。またこれらの気象要因の季節変動は毎年比較的一定であると仮定できる事から長期的な NDVI の変動傾向を解析するために NDVI の一年以内の周期性を除去した。

統計的な手法を用いた時系列データの分解には加法、乗法モデルの二種類のモデルがある。加法、乗法モデルは次の式によって示す

事ができる。

加法モデル

$$Y_t = S_t + T_t + E_t \quad (3)$$

乗法モデル

$$Y_t = S_t \times T_t \times E_t \quad (4)$$

$Y_t$  = 時系列データ

$S_t$  = 季節変動

$T_t$  = トレンド

$E_t$  = 不規則変動

加法モデルは時系列データの増減が季節変動の増減に影響しないモデルに適している。一方、時系列データの増減が季節変動の増減に影響を与えるモデルには乗法モデルが適している(Makridakis *et al.*, 1998)。植生において、植生の成長を左右する最も大きな要因は気象要因であると考えられ、気象要因の季節変動の増減は NDVI の時系列データの増減に影響を与えると考える事ができるので、本研究では NDVI の時系列データの分解に乗法モデルを用いた。図 3a は西部に位置するピクセルの NDVI の時系列データ( $Y_t$ )とその構成要素( $S_t$ ,  $T_t$ ,  $E_t$ )を示している。NDVI の時系列データ( $Y_t$ )は式(4)により構成要素( $S_t$ ,  $T_t$ ,  $E_t$ )を乗算する事によって求められる。図 3b は一年以内の周期性を除去した NDVI の時系列データを示している。一年以内の周期性を除去した NDVI の時系列データは季節変動( $S_t$ )以外のトレンド( $T_t$ )と不規則変動( $E_t$ )を乗算する事によって求められる。この一年以内の周期性を除去した NDVI の時系列データを用いて NDVI の時系列解析を行った。長期的な NDVI の変動傾向を解析するために周期性を除去した NDVI の時系列データに対して線形の傾向式を与えた。線形の傾向式の有意性を判断するために傾向式の傾きに対して有意水準を 10%とした T 検定を行った。屋久島を構成する全てのピクセルに対して同様の解析を行った。線形の傾向式の傾きを各ピクセルに代入し屋久島全域における NDVI の変動傾向を示す画像を作成した。海岸線周辺のピクセルは時期によって陸と海を代表する別々の値を持つ場合があるが、その様なピクセルから NDVI の変動傾向を解析する事は不可能である事から、海岸線周辺を構成する幾つかのピクセルは傾向式の傾きを代入する際に解析から除外した。

## 6.2 サブピクセル分類

サブピクセル分類は画像のピクセルよりも小さい物質 (Landsat ETM+センサーでは 30m × 30m 以内) を分類するのに用いられる。一般的な画像のピクセルは対象物以外の様々な物質を含んでいる。各ピクセルのスペクトルは対象物とその他の物質によって構成されている。サブピクセル分類の概念は次の式によって定義することができる:

$$P_m = (f_m \times M) + \{(1 - f_m) \times B_m\} \quad (6)$$

$P_m$  =ピクセル

$f_m$  =対象物の割合

$M$  =対象物

$1 - f_m$  =バックグラウンド物質の割合

$B_m$  =バックグラウンド物質

サブピクセル分類では個々のピクセル ( $P_m$ ) は対象物 ( $M$ ) を幾つかの割合 ( $f_m$ ) で含んでおり、その他はバックグラウンド物質 ( $B_m$ ) の割合 ( $1 - f_m$ ) で構成される (Huguenin *et al.*, 1997)。サブピクセル分類にはピクセルを構成するスペクトル成分を分解、または結合する二種類の手法がある。linear mixing model (LMM) は画像から定義された幾つかのスペクトル成分 (endmember) を用いて画像のスペクトルを構成していく手法である。一方、本研究ではピクセルのスペクトルを構成要素に分解し、対象物質のスペクトルと一致するスペクトル成分があるかどうかを評価する手法を用いた (Huguenin and Robert, 1994)。ERDAS Imagine Subpixel Classifier™ はサブピクセル分類を行うソフトであるが、このソフトはピクセルのスペクトルを構成要素に分解し、参照するスペクトルと一致するかどうかを評価する二つめの手法を用いている (Karaska *et al.*, 1995; Huguenin *et al.*, 1997)。本研究ではこのソフトを用いて屋久島の各植生帯に対してサブピクセル分類を行った。

図 5a は半高山帯地域のササ・タケ群落におけるサブピクセル分類の分類画像を示している。この図によるとササ・タケ群落の割合 (fraction of target material) は比較的高く、屋久島の中心部付近でササ・タケ群落の密度が高い事が確認できた。図 4 は最尤分類法を用いた植生帯の教師付き分類を示している。この図によると最尤分類法による教師付き分類ではスギ天然林、シイ・カシ萌芽林地域の内部に

おいてもササ・タケ群落として分類された地域が存在する。環境省によって作成された植生図や空中写真判読による解析ではそれらの地域はササ・タケ群落ではない可能性が高いが、最尤分類法による教師付き分類では結果としてササ・タケ群落として分類されてしまった。サブピクセル分類と最尤分類法による教師付き分類を比較するとサブピクセル分類によるササ・タケ群落の分類はピクセル単位の分類法より、より現実的であると考えられる。

図 5b はスギ天然林におけるサブピクセル分類の分類画像を示している。この図によるとスギ天然林は半高山帯地域のササ・タケ群落の周囲に分布している事が確認できた。また図 4 の最尤分類法による教師付き分類でもこの傾向が確認できた。しかしながら、サブピクセル分類の結果ではスギ天然林の南部で天然林の密度が高い事が確認できた。図 5c はシイ・カシ萌芽林のサブピクセル分類の分類画像を示している。シイ・カシ萌芽林はスギ天然林の周囲に分布している事が確認できた。またシイ・カシ萌芽林地域の南西部でシイ・カシ萌芽林の密度が高い事が確認できた。図 5d はスギ・ヒノキ・サワラ植林のサブピクセル分類の分類画像を示している。スギ・ヒノキ・サワラ植林地はシイ・カシ萌芽林の分布とよく似ているが、この植林地は主に北部から西部の海岸線付近に分布していることが確認できる。疎らで密度も低い、南東部でもスギ・ヒノキ・サワラ植林地を確認する事ができた。

## 7. 結果と考察

本研究では 1994 年 9 月から 2002 年 8 月までの NOAA AVHRR NDVI コンポジットデータを用いて屋久島全域における NDVI の時系列解析を行った。屋久島を構成する全てのピクセルに対して NDVI の時系列グラフを作成した。長期的な NDVI の変動を解析するために一年以内の周期性を除去し、線形の傾向線を求めた。図 6 は線形の傾向式の傾きを屋久島の各ピクセルに代入して作成した画像である。オレンジ色から赤色で示された地域は NDVI が増加傾向を示している地域を指し、水色から青色で示された地域は NDVI が減少傾向を示している地域を指している。この図から屋久島の西部、

北西部でNDVIが比較的增加傾向にあり、東部、南東部でNDVIが比較的減少傾向にある事が確認できる。周期性を除去したNDVIの時系列グラフに対して線形の傾向式を求め、その傾向式の統計的な有意性を判断するために有意水準を10%としたT検定を行った。図7はNDVIの変動傾向に統計的に有意性を持つ地域を示している。この図において屋久島の大部分を占める緑色の地域は傾向式の傾きに統計的に有意性がない地域を示している。したがって、これらの地域では8年間の期間でNDVIがあまり変化していない事を意味する。一方、西部、北西部を占めるオレンジ色から赤色の地域、または、東部、南東部を占める水色から青色の地域はそれぞれ傾向式の増加傾向、減少傾向に統計的に有意性がある地域を示している。1/25,000地形図とのオーバーレイ解析で傾向式の増加傾向に統計的に有意性のある地域は永田、西部林道周辺に分布しており、傾向式の減少傾向に統計的に有意性がある地域は安房、荒川ダム、淀川登山口周辺に分布している事が確認できた。図8は数値標高モデルを用いて地形を強調したNDVIの変動傾向を示している。この図からNDVIの変動傾向の特徴として標高や傾斜よりも地域的な影響が強いという事が確認できた。またNDVIの増加傾向は海岸線周辺など標高が低い地域でより高い事が確認できた。NDVIの増加傾向に統計的に有意性が認められた西部林道周辺地域は世界自然遺産保全地域に指定されている地域である。西部林道は舗装されており、車両も通行する事ができるが、開発は厳しく制限されている地域である。また永田は宮之浦や安房と比較すると観光客の数も少なく、人口も少ない集落である。したがって、西部林道や永田で確認できたNDVIの増加傾向は自然に起こった可能性が高い。一方、NDVIの減少傾向が認められた地域は荒川ダム、淀川登山口周辺の山地、安房周辺の開発が進んだ低地に分布している。安房は屋久島で宮之浦に次ぐ二番目に大きな港で、商業地と住宅地から成る開発された地域である。したがって、安房周辺で確認できたNDVIの減少傾向は開発による森林の減少によって起こった可能性が高い。一方、淀川登山口周辺は世界自然遺産保全地域に指定されており、荒川ダム周辺は国有林地域に指定さ

れている事から、これらの地域では開発は禁止されているか、厳しく制限されている。したがって、これらの地域で確認されたNDVIの減少傾向は自然に起こった可能性が高い。NDVIはバイオマス生産量の推定(Prince, 1991)、または葉中クロロフィル色素濃度の指標(Myneni *et al.*, 1995)として用いられる事からNDVIが減少傾向を示している地域では植生の衰退が起こっており、NDVIが増加傾向を示している地域では植生の活性化が起こっている可能性が高い。

図9aはNDVIの変動傾向を示す画像と半高山帯に分布するササ・タケ群落のサブピクセル分類の分類画像を用いてオーバーレイ解析を行った結果である。この図でNDVIの変動傾向は白黒で示されている。この図から半高山帯に位置するササ・タケ群落はNDVIの傾向が比較的一定である地域に位置している事が確認できる。図9bはNDVIの変動傾向を示す画像とスギ天然林のサブピクセル分類の分類画像を用いてオーバーレイ解析を行った結果である。スギ天然林のサブピクセル分類ではスギ天然林地域の南部でスギ天然林の比率が高い事が確認できたが、そのスギ天然林の南部、南東部地域でNDVIの減少傾向が確認できた。図9cはシイ・カシ萌芽林のサブピクセル分類の分類画像とNDVIの変動傾向を示す画像を用いてオーバーレイ解析を行った結果である。この図でシイ・カシ萌芽林はNDVIが増加・減少の両方の傾向を持った地域に分布している事が確認できる。図9dはスギ・ヒノキ・サワラ植林地のサブピクセル分類の分類画像とNDVIの変動傾向を示す画像を用いてオーバーレイ解析を行った結果である。この図によるとシイ・カシ萌芽林の分類データを用いて行ったオーバーレイ解析と同様に、スギ・ヒノキ・サワラ植林地はNDVIが増加・減少の両方の傾向を持った地域に位置している事が確認できた。図10はNDVIの変動傾向を示す画像と年平均降水量のデータ(高原、松本, 2002)を用いてオーバーレイ解析を行った結果である。一般的に屋久島では西部より東部の方が降水量が高い。屋久島の山岳地域の年平均降水量はおよそ5,000から7,400mmである。一方、海岸地域の年平均降水量はおよそ2,400から5,000mmである。屋久島では荒川ダム周

辺で降水量が最も高く、年平均降水量は7,373mmである。図10で荒川ダム周辺の年平均降水量が最も高い地域ではNDVIの変動傾向が減少傾向を示している事が確認できた。また永田、西部林道周辺のNDVIが増加傾向を示している地域では年平均降水量が低い事が確認できた。図11はNDVIの変動傾向を示す画像と表流水pHのデータ(Nakano *et al.*, 2001)を用いてオーバーレイ解析を行った結果である。表流水サンプルの採取は1996年3月、1997年10月、1998年7月に行われた。図11によるとpHが6.47から6.96までの表流水は屋久島全域の海岸線周辺に分布している。一方、pHが5.27から6.47までの表流水は屋久島中心部、東部、南東部の山岳地域に分布している。屋久島の表流水pHは標高が高くなり、降水量が高くなるにつれて酸性物質をより多く含むようになり、pHが低下する(Nakano *et al.*, 2001)。表流水pHとNDVIの変動傾向を示す画像を比較するとpHが5.27から6.47の表流水は主にNDVIが減少傾向を示している地域に分布している事が確認できた。したがって、スギ天然林地帯で起こっているNDVIの減少傾向は降水による酸性化が影響している可能性がある。図12はNDVIの変動傾向を示す画像と表流水中のシリカ濃度のデータを用いてオーバーレイ解析を行った結果である。屋久島の大部分を覆っている花崗岩の化学的風化作用が比較的低いために屋久島の表流水中のシリカ濃度は他の日本の地域の表流水と比べると比較的低く、大気や土壌-植物系から寄与される大量の酸性物質を中和するのに十分でない(Nakano *et al.*, 2001)。また屋久島では標高が高くなるにつれて表流水中のシリカ濃度が減少するが、南東部と比較して北西部のシリカ濃度が高い事が確認できる。南東部と北西部で表流水のpH値が変化しないと仮定すると、北西部で花崗岩の化学的風化作用が比較的高いという事が分かる(Nakano *et al.*, 2001)。2002年8月に行った現地調査においても北西部に位置する土面川流域では花崗岩の風化作用が高い事が確認できた。図12において表流水中のシリカ濃度が比較的高い西部、北西部地域においてNDVIの増加傾向が確認できた。これらの地域では花崗岩の化学的風化作用がその他の地域と比較して高いと考

えられる事から酸性化に対する耐性が比較的高い為に植生の衰退が起こらなかったのではないかと推測できる。図13は屋久島測候所(北緯: 30°23', 東経: 130°40')と尾の間アメダス(北緯: 30°14', 東経: 130°33')で得られた1994年9月から2002年8月における平均気温の時系列変化を示している。また、これら二つのグラフに線形の回帰式を求めた。その結果、1994年から2002年までの8年間で平均気温が徐々に増加している事が確認できた。Kawabata *et al.*(2001)によると北半球の中緯度地域では近年の平均気温の上昇に伴い広い地域で植生の活性化が起こっていると報告している。屋久島の西部、北西部のNDVIの増加傾向が確認されている地域では酸性化に対する耐性が比較的高いために植生の衰退が起こっておらず、逆に平均気温の上昇による植生の活性化が起こっているのではないかと考えられる。

## 8. 結論

本研究は1)リモートセンシングと地理情報システムの手法を用いて屋久島における植生状態の時空間的な変動を解析し、2)植生状態の時空間的な変動を議論するという二つの目的があった。屋久島における植生状態の時空間的な変動を解析するためにNOAA AVHRRとLandsat ETM+という二種類の衛星データを用いた。NOAA AVHRRデータを用いた解析ではNDVI10日間コンポジットデータを用いて1994年9月から2002年8月までの期間で屋久島全域におけるNDVIの時系列解析を行った。Landsat ETM+データを用いた解析では2001年3月19日に撮られたデータを用いて植生分類を行った。NDVIの変動傾向を多角的に解析するために降水量、表流水pH、表流水中のシリカ濃度などの補助データを用いてオーバーレイ解析を行った。

研究の結果、屋久島の異なる地域でNDVIの増加傾向と減少傾向が同時に起こっている事が確認できた。NDVIの増加傾向は西部林道や永田が位置する西部、北西部で確認でき、NDVIの減少傾向は安房や荒川ダムが位置する東部、南東部で確認できた。NDVIが減少傾向を示している地域ではヤクスギを主体としたスギ天然林が分布しており、NDVIが増加傾向を示し

ている地域ではシイ・カシ萌芽林やスギ・ヒノキ・サワラ植林が分布していた。また NDVI が減少傾向を示している地域と降水量が最も高く、表流水 pH が低い地域が一致した。また西部、北西部の NDVI が増加傾向を示している地域と表流水中のシリカ濃度が比較的高い地域が一致した。

以上の研究結果を基に次の三つの可能性が挙げられた。1) NDVI の減少傾向が確認されている地域では植生の衰退が起こっており、NDVI の増加傾向が確認されている地域では植生の活性化が起こっている可能性が高い、2) NDVI の減少傾向が確認された地域では降水量が高く、表流水 pH が低い事が確認された事で主にスギ天然林地域で起こっている NDVI の減少傾向は酸性化による植生の衰退が起こっている可能性が高い、3) 表流水中のシリカ濃度が比較的高く、酸性化に対する耐性が比較的高いと考えられる地域では NDVI の増加傾向が起こっている事が確認できた。そこでこれらの地域では植生の衰退は起こっていない、現在北半球の中緯度地域で確認されている気温の上昇による NDVI の増加傾向が起こっている可能性がある。

本研究は主にリモートセンシングと地理情報システムの手法を用いて屋久島における植生状態の時空間的な変動を解析した。研究の結果、幾つかの結果が得られ、その結果に対する原因を示唆する事ができた。しかしながら、リモートセンシングと地理情報システムだけを用いた解析では示唆された原因を検証する事は難しいと考えられる。そこで今後の研究では本研究の結果を基にフィールド調査を主体とした植生、土壌、降水などの調査、研究を行っていく事が必要であると考えられる。

本研究で用いた NOAA AVHRR データは農林水産研究情報センターが運営している Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries research Network-Satellite Image Database System of Agriculture (MAFFIN-SIDaB) から配布された。

#### 引用文献

- Asrar, G. (1989): *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, Wiley, New York.
- Civco, D. L. (1989): Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **55**, 1303-1309.
- ERDAS (1999): *ERDAS Field Guide<sup>TM</sup>*, 5<sup>th</sup> ed. Atlanta, GA: ERDAS, Inc., 672p.
- Goward, S. N., Markham, B., Dye, D. C., Dulaney, W., and Yang, J. (1991): Derivation of quantitative NDVI measurements from AVHRR observations. *Remote Sensing of Environment*, **35**, 257-277.
- Holben, B. N. (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1417-1434.
- Huguenin, R. L., Karaska, M. A., Van Blaricom, D., and Jensen, J. R. (1997): Subpixel Classification of Bald Cypress and Tupelo Gum Trees in Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**, 717-725.
- Huguenin R. L. and Robert, L. (1994): Subpixel Analysis Process Improves Accuracy of Multispectral Classifications. *Earth Observation Magazine*, **3**, 37-40.
- Ichii, K., Kawabata, A., and Yamaguchi, Y. (2002): Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. *International Journal of Remote Sensing*, **23**, 3873-3878.
- Karaska, M. A., Huguenin, R. L., Van Blaricom, D., and Savitsky B. (1995): Subpixel Classification of Cypress and Tupelo Trees in TM Imagery. Technical Papers of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Charlotte, NC, 856-865.
- Kawabata, A., Ichii, K., and Yamaguchi, Y. (2001): Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, **22**, 1377-1382.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., and Hyndman, R. J. (1998): *Forecasting: Methods and Applications*, 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, 642p.



- Ministry of Environment, Government of Japan (no date): Yakushima World Heritage Area Management Plan. "Internet: <http://www.env.go.jp/en/jeg/yakushima/heritage.html>" Viewed December, 29, 2002.
- Moody, A. and Strahler, A. H. (1994): Characteristics of composited AVHRR data and problems in their classification. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 3473-3491.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., and Marshak, A. L. (1995): The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **33**, 481-486.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., and Nemani, R. R. (1997): Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, **386**, 698-702.
- Myneni, R. B., Tucker, C. J., Asrar, G., and Keeling, C. D. (1998): Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, **103**, 6145-6160.
- Nakano, T., Okumura, M., Yamanaka, M., and Satake, K. (2001): Geochemical Characteristics of Acidic Stream Water on Yakushima Island, a World Natural Heritage Site. *Water, Air, and Soil Pollution*, **130**, 869-874.
- Nakano, T., Yokoo, Y., Anma, R., and Shindo, J. (2001): Ca Depletion in the Soil Column on a Granite Substrate on the Island of Yakushima, a World Natural Heritage Site. *Water, Air, and Soil Pollution*, **130**, 733-738.
- Nemani, R. R., and Running, S. W. (1989): Estimation of surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *Journal of Climate Applied Meteorology*, **28**, 276-294.
- Prince, S. D. (1991): A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1313-1330.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W. (1973): Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *Proceedings, 3<sup>rd</sup> ERTS Symposium*, **1**, 48-62.
- Satake, K., Inoue, T., Kasasaku, K., Nagafuchi, O., and Nakano, T. (1998): Monitoring of nitrogen compounds on Yakushima Island, a world natural heritage site. *Environmental Pollution*, **102**, 107-113.
- Spanner, M. A., Pierce, L. L., Peterson, D. L., and Running, S. W. (1990): Remote sensing of temperate coniferous old-growth forest leaf area index: The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, **11**, 95-111.
- Townshend, J. R. G., Justice, C. O., and Kalb, V. (1987): Characteristics and classification of South American land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **8**, 1189-1207.
- Tucker, C. J., Fung, I. Y., Keeling, C. D., and Gammon, R. H. (1986): Relationship between atmospheric CO<sub>2</sub> variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature*, **319**, 195-199.
- Tucker, C. J., and Sellers, P. J. (1986): Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1395-1416.
- Tucker, C. J., Van Praet, C., Boerwinkle, E., and Gaston, A. (1983): Satellite remote sensing of total dry matter production in the Senegalese Sahel. *Remote Sensing of Environment*, **13**, 461-474.
- UNEP World Conservation Monitoring Centre (2001): Protected Areas Programme. "Internet: <http://www.unep-wcmc.org/sites/wh/yaku.html>" Viewed December, 29, 2002.
- 高原宏明、松本淳 (2002): 屋久島の降水量分布に関する気候学的研究、地学雑誌、**111**、726-746.
- 長淵修 (2000): 屋久島における大陸汚染物質の飛来と樹木衰退の現状、日本生態学会誌、**50**、303-309.

表1. 使用したLandsat ETM+データの特徴

センサー	ETM+
観測日 (yyyymmdd)	20010319
衛星	Landsat 7
パス(K)	112
ロウ(J)	39
軌道	下降軌道
受信局	鳩山受信局
太陽高度	49.70
太陽方位	136.14
ビット数	8

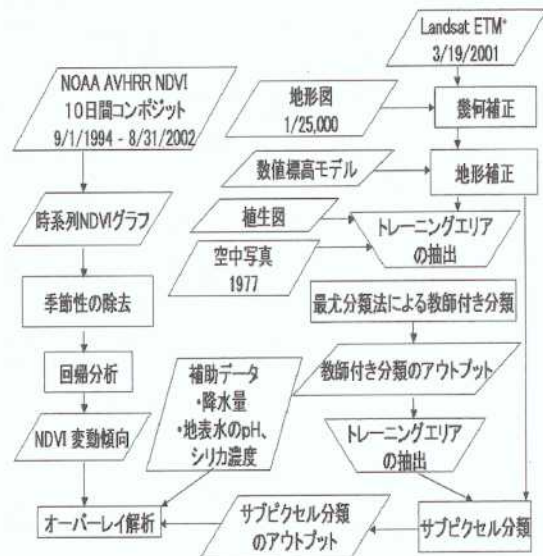


図2. 研究手法

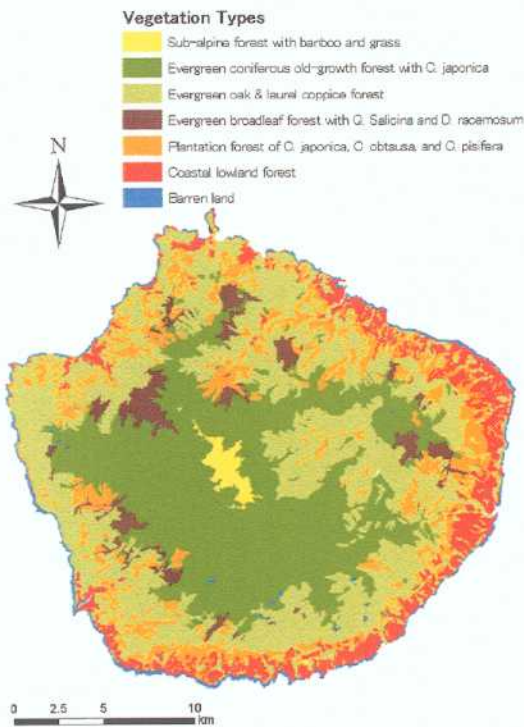


図1. 屋久島の植生図

出典：自然環境情報 GIS、環境省

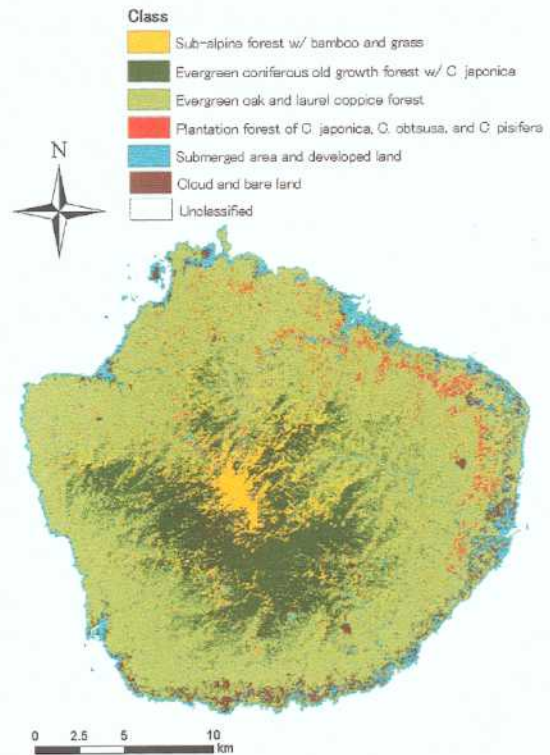


図4. 最尤分類法による植生帯の教師付き分類

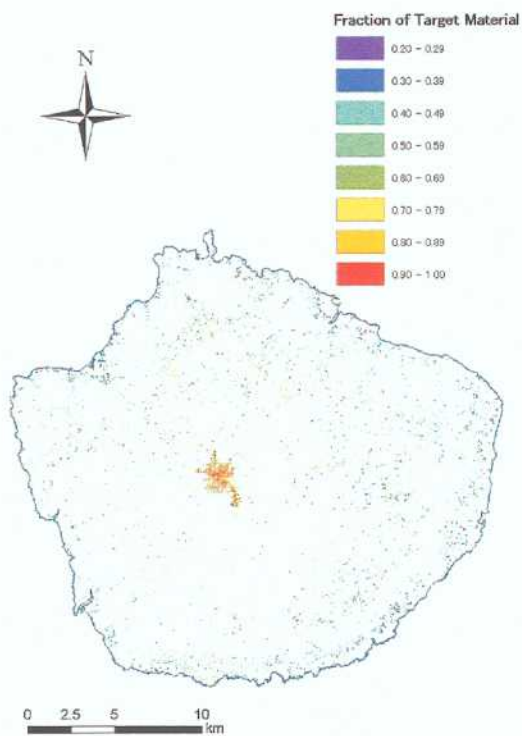


図 5a. ササ・タケ群落のサブピクセル分類

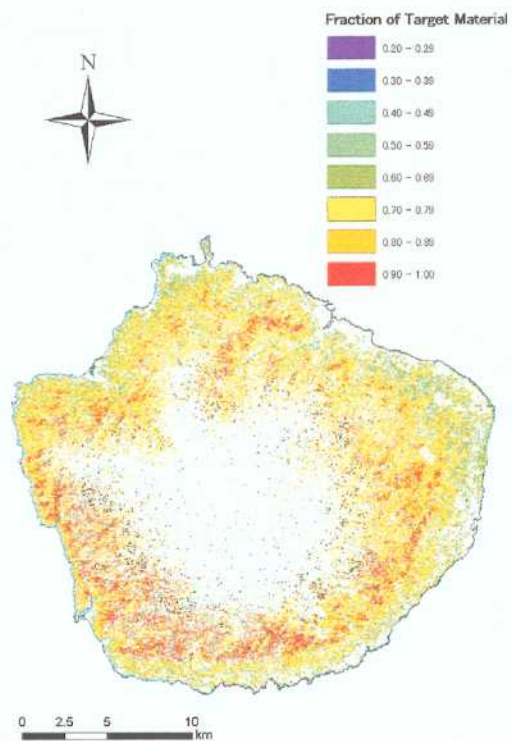


図 5c. シイ・カシ萌芽林のサブピクセル分類

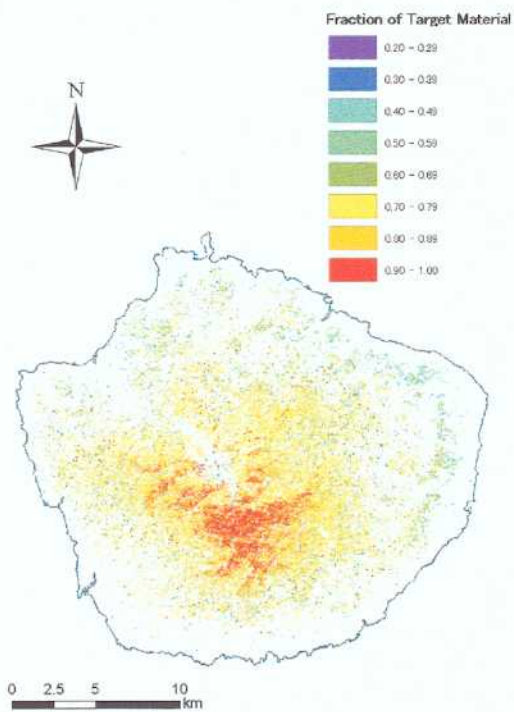


図 5b. スギ天然林のサブピクセル分類

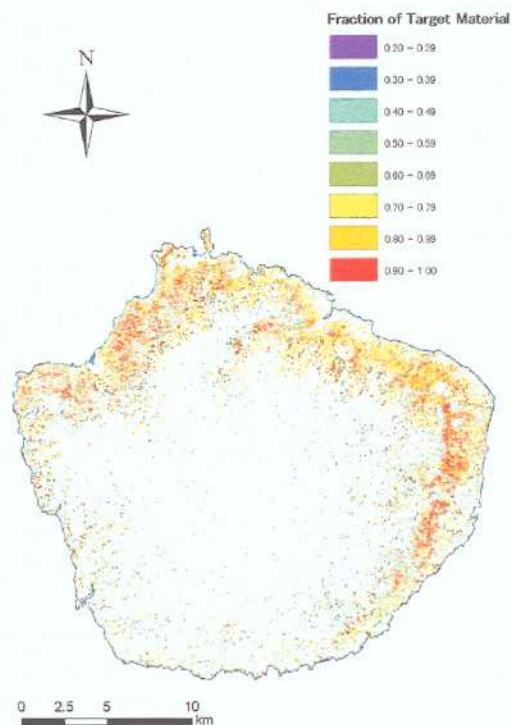


図 5d. スギ・ヒノキ・サワラ植林のサブピクセル分類

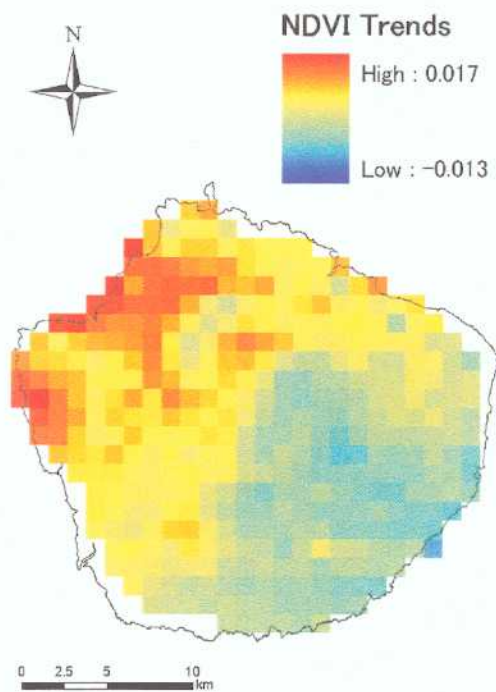


図 6. NDVI の変動傾向

ピクセルサイズ: 1km x 1km

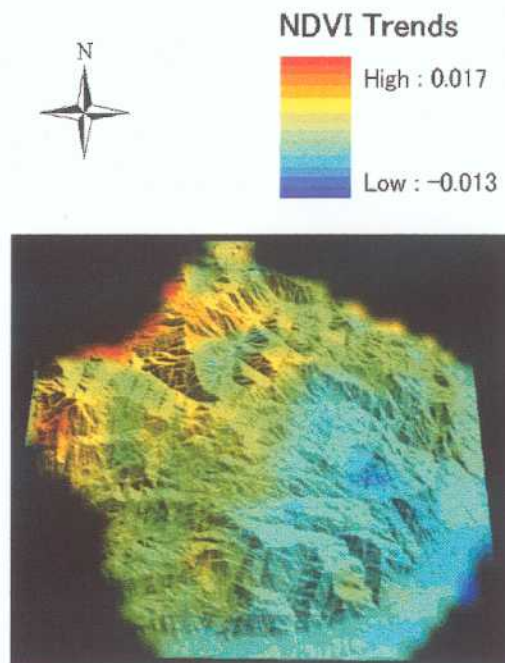


図 8. 数値標高モデルを用いて地形を強調した NDVI の変動傾向

数値標高モデルの出典: 50m メッシュ (標高)、  
国土地理院

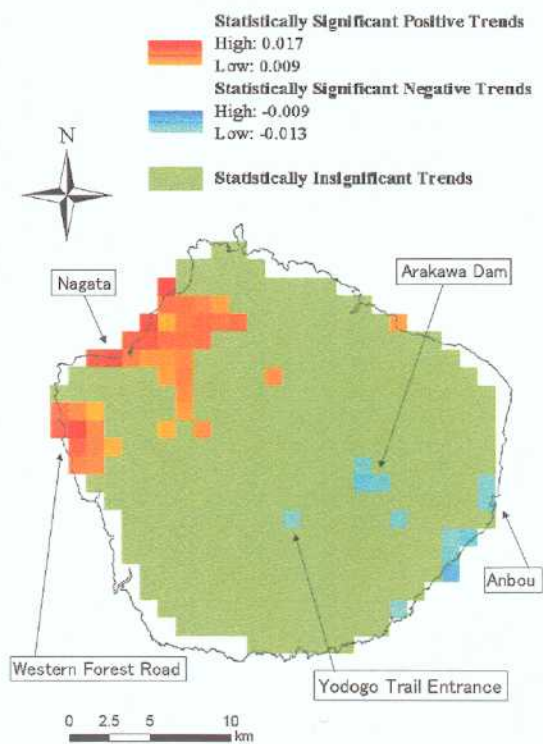


図 7. NDVI の変動傾向に統計的に有意性を持つ地域

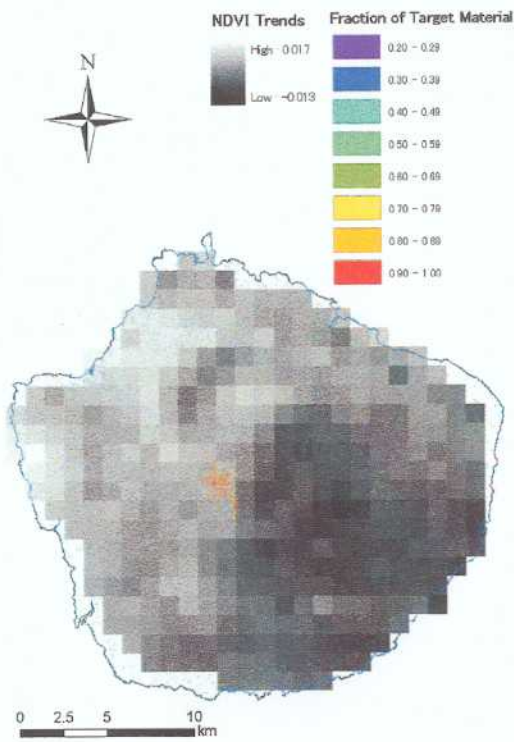


図 9a. ササ・タケ群落のサブピクセル分類と NDVI の変動傾向を用いたオーバーレイ解析

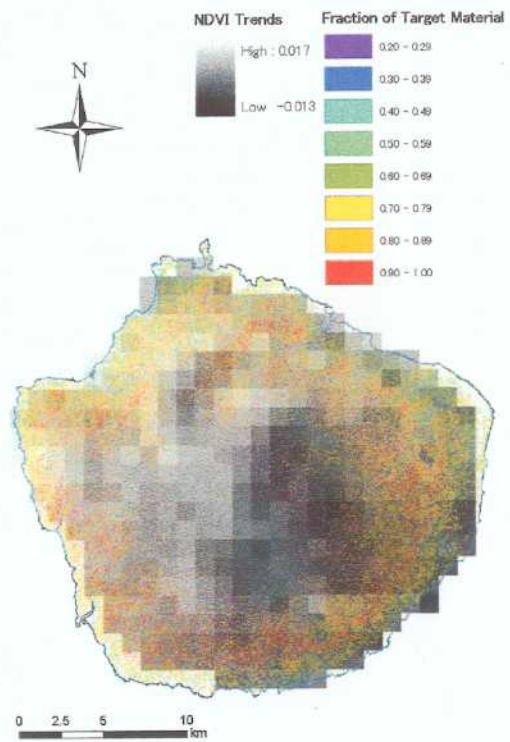


図 9c. シイ・カシ萌芽林のサブピクセル分類と NDVI の変動傾向を用いたオーバーレイ解析

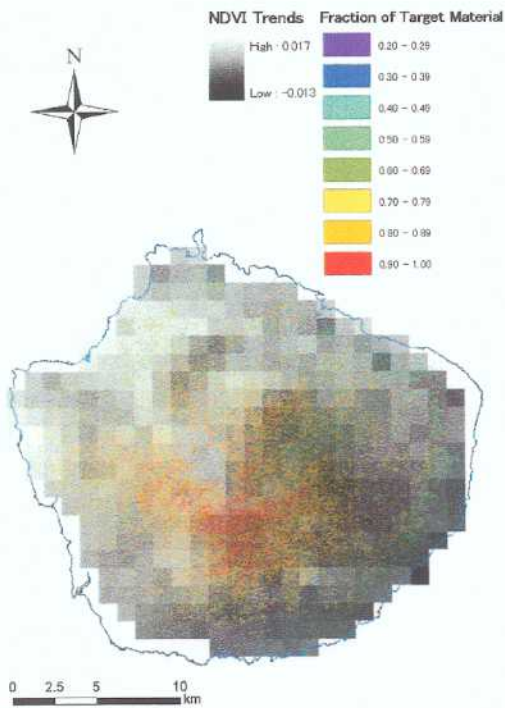


図 9b. スギ天然林のサブピクセル分類と NDVI の変動傾向を用いたオーバーレイ解析

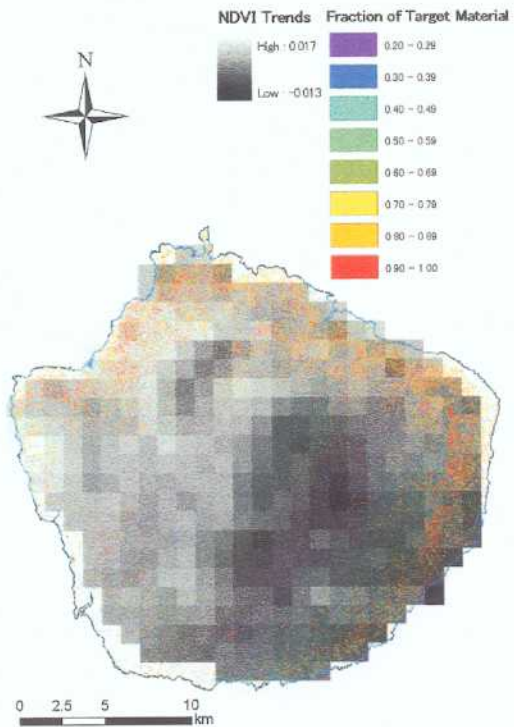


図 9d. スギ・ヒノキ・サワラ植林のサブピクセル分類と NDVI の変動傾向を用いたオーバーレイ解析

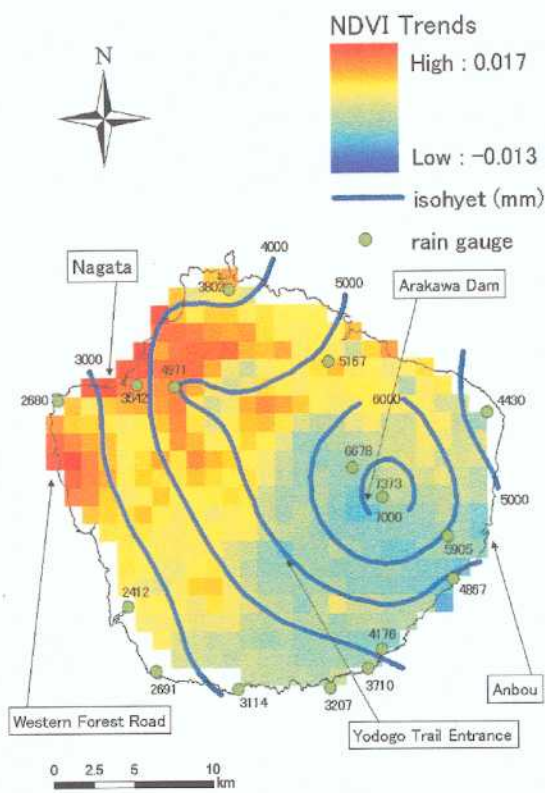


図 10. NDVI の変動傾向と年平均降水量のデータを用いたオーバーレイ解析  
降水量データの出典：高原、松本(2002)

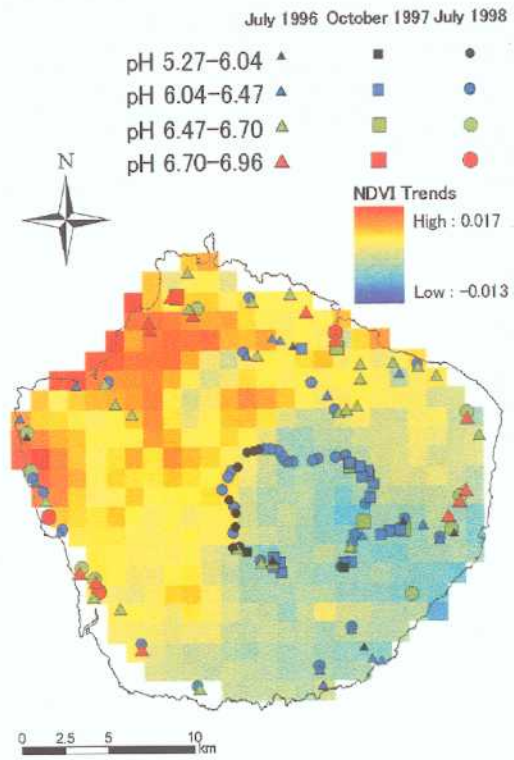
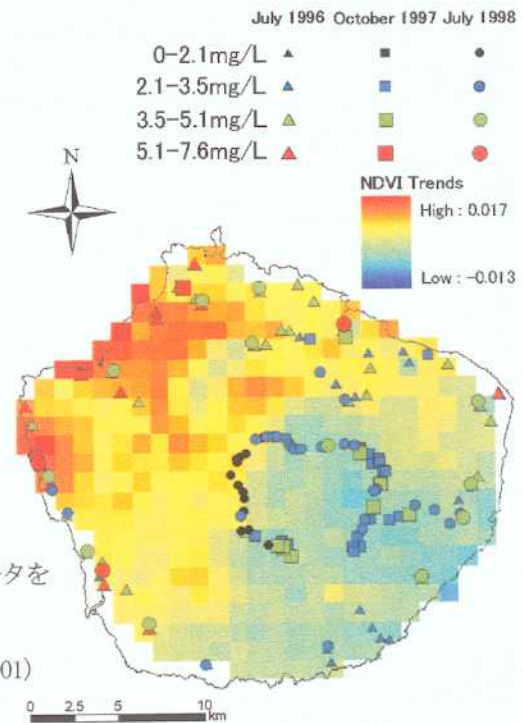


図 11. NDVI の変動傾向と表流水 pH のデータを用いたオーバーレイ解析  
表流水 pH のデータの出典：Nakano *et al.*(2001)

図 12. NDVI の変動傾向と表流水中のシリカ濃度のデータを用いたオーバーレイ解析  
表流水中のシリカ濃度のデータの出典：Nakano *et al.*(2001)



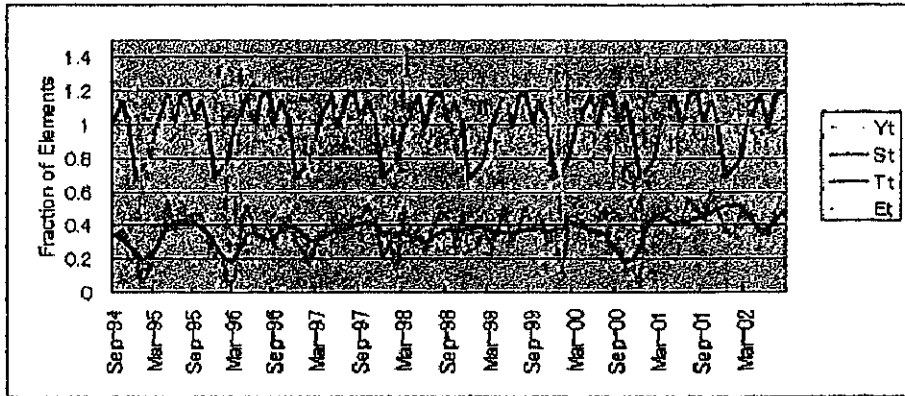


図 3a. NDVI の時系列データ ( $Y_t$ ) とその構成要素 ( $S_t$ ,  $T_t$ ,  $E_t$ )

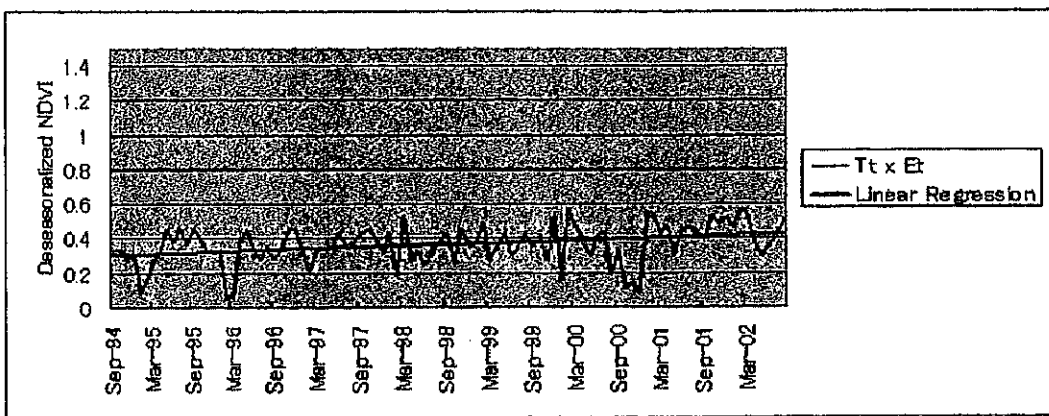


図 3b.  $T_t$  と  $E_t$  を乗算することによって得られた一年以内の周期性を除去した NDVI の時系列データとそのデータに対して求めた線形の傾向式

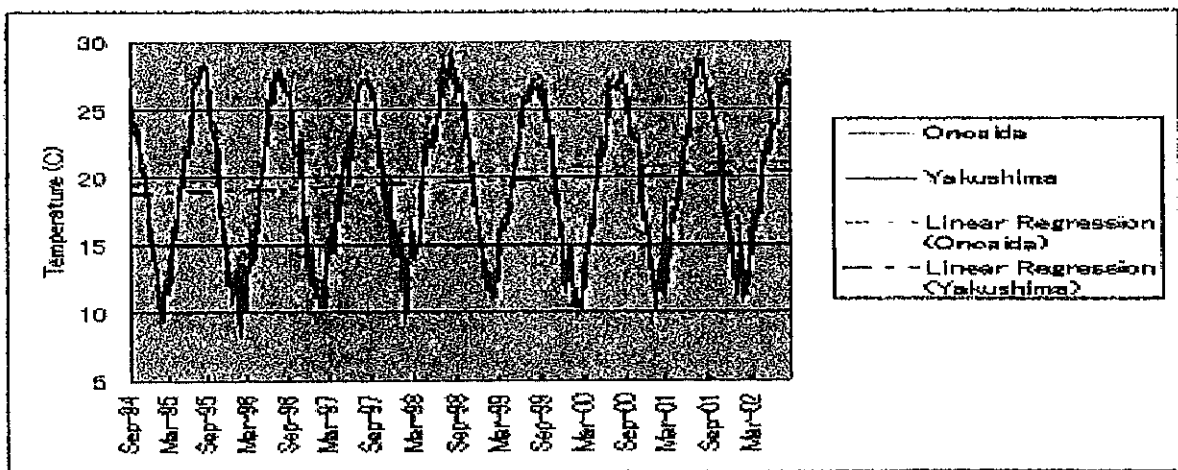


図 13. 屋久島測候所、及び尾の間アメダスにおいて 1994 年 9 月から 2002 年 8 月までに観測された平均気温の時系列データとそれらのデータに対して求めた線形の回帰式