

E-5 NOAA AVHRR (LAC) 画像データを用いた東南アジア地域の
植生指数図及び植生分布図作成手法に関する研究

課題研究代表者： 国立環境研究所 安岡 善文

環境庁 国立環境研究所

社会環境システム部

情報解析研究室

安岡 善文、山形 与志樹

資源管理研究室

乙間 末広

地球環境研究グループ

森林減少・砂漠化研究チーム

宮崎 忠国

(委託先)

東京大学生産技術研究所

柴崎 亮介

東京大学工学部

藤村 貞夫

岩手大学工学部

横山 隆三

平成3-5年度合計予算額 55,687千円

(平成5年度予算額 19,152千円)

〔要旨〕本研究の目的は、NOAA AVHRRデータによる東南アジア地域のモザイク画像作成、及びそれに基づく主題図(植生分類図及び植生指数図)の作成手法を確立することである。このために、衛星画像を合成し、精度良く地図上に重ね合わせるための幾何補正手法、及び撮影日や撮影時刻の異なったデータからむらのないモザイク画像を作成するための放射量補正手法の開発を行った。さらに、作成された主題図の時系列解析により、植生の経年変化を調査する手法の開発をした。

衛星画像は太陽、センサー、標的の位置関係によって各種の歪みが生じる。本研究では、地上基準点(GCP)が少ない場合でも幾何補正を可能にするとともに、センサーの走査角及び地表面の標高による幾何的歪みを精度良く補正する新しい手法を開発した。

また、観測時刻による放射照度の違いを補正する放射量補正手法の導入と、異なる画像における対応点の自動選定手法の開発により、海岸線だけでなく空間的特徴に欠ける内陸部分においても不連続性はほとんど見られない良好なモザイク画像が作成できた。植生の活性度を精度よく評価するために、衛星センサーが備えるべき分光特性についても検討した。

大気効果はLOWTRAN-7によるシミュレーションにより徹底的に調べた。その結果をもとに対象領域のデジタル標高モデル及び大気モデルが与えられていることを前提として、NDVI分布図を作成する方法を提案し、実際のAVHRR画像に適用して、精度の高い植生指標分布図が得られることを確認した。

以上の開発、検討結果を基に、東南アジア及びインド地域のモザイク画像ならびに植生指数画像を作成し、その経年変化を評価した。さらに、地表面被覆の変化を精度良く抽出する目的から、各年次の画像スペクトル特性を主成分分析と波形相関法によって比較した。後者は検出感度の高い変化抽出手法であるが、AVHRR画像への適用には問題点もあることが明らかになった。

〔キーワード〕 リモートセンシング、植生指数図、モザイク画像、NOAA、東南アジア

1. 序

世界の森林は、1980年代には年間 500万ヘクタールの割合で減少しており、今後もこのペースで減少し続ければ2000年までには世界の森林の16%が消失すると予想されている。特に、アジア地域における、商業伐採、焼き畑農業、燃料材・家畜飼料の採取、農地・住宅地への転用などによる森林破壊が著しいと言われている。

一方、ここ数年、アジア地域では、大洪水、台風といった従来見られなかったほどの大型自然災害が発生し、大きな被害に見舞われている。また、夏期には、各地で異常高温を記録するなど著しい気候の変化が観測されている。これらの現象は森林減少に起因する小、中規模の気候変動が原因であると指摘されているが、その原因を明確にするためにはこの地域における森林の状況およびその変化を正確に把握することが必要不可欠である。

本研究の目的は、NOAA-AVHRR (LAC)データ (解像度 1 km) による東南アジア地域のモザイク画像作成、及びそれに基づく主題図(植生分類図及び植生指数図)の作成手法を確立することである。このために、衛星画像を合成し、精度良く地図上に重ね合わせるための幾何補正手法、及び撮影日や撮影時刻の異なったデータからむらのないモザイク画像を作成するための放射量補正手法の開発を行った。さらに、作成されたモザイク画像から主題図を作成するためのデータ処理手法、これら主題図の時系列解析から植生の経年変化を調査する手法等を開発した。

2. 幾何補正手法の開発 (東京大学生産技術研究所)

衛星画像に含まれる各種の歪みは太陽、センサー、標的の位置関係によってその程度が異なる。いわゆる Sun-Target-Sensor Geometry (STSG) 効果である。図 1 は、AVHRR(LAC)画像の 1 画素が占める地上投影面積 (地上分解能) と標的の衛星直下からの距離に対応するセンサー走査角の関係を求めたものであり、図 2 はそのときの光学的厚さと透過率を示す。これらの結果から、軌道の両側をそれぞれ 55.4° ずつ走査している AVHRR センサーの画像の質は観測端付近において幾何学的にも放射量的にも悪いことが分かる。

(1) 衛星の軌道要素を用いた幾何補正法

NOAA AVHRR画像の幾何補正法としては、衛星軌道予想情報を用いるシステム補正が一般的であるが、この補正法では数画素の誤差が残存し、モザイク画像の作成のように高い幾何学的精度を必要とする場合には不向きである。一方、高精度な幾何補正法としては、地上基準点(GCP)を用いる方法が知られているが、従

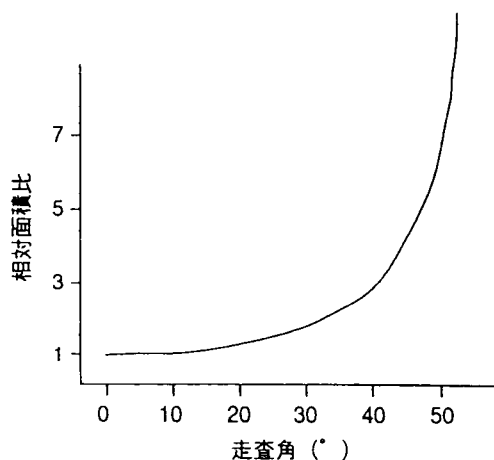


図 1 走査角と地上投影面積比

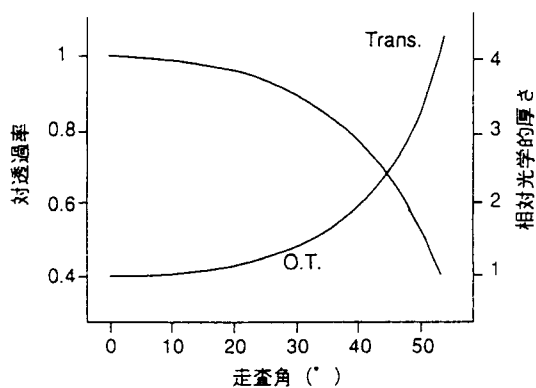


図 2 走査角と透過率・光学的厚さ

来の方法では多くのGCPを必要とする。本研究では、軌道要素及び衛星姿勢をパラメータとして扱い、写真測量の原理からこれらのパラメータの最確値を求める方法を開発した。さらに、GCPが少ない時にどのパラメータを未知変量とするのが最も効果的かを検討して、少数のGCPの場合にも適用可能なものとした。

数学モデルは、投影中心（センサ位置）、画像および地上の対象物が一直線上にあるという共線条件式から誘導した。ただし、地球の形状を回転楕円体で近似し、地上座標は地心座標系で表し、画像座標は航跡方向をx、軌道法線方向をzとする右手系で表した。また、モデルに含まれるパラメータ推定法として、米国海洋大気庁が提供している衛星軌道予想情報とGCPを用いて最確値を求める手法を開発した。

実際には、GCP数に制限があり決定できる未知変量の個数が限られてくるので、どのパラメータを未知変量扱いにするかを決めなければならない。そこで、1)パラメータ間に強い相関がある時は、それらのうち代表1つを未知変量とし他は固定値とする、2)時間的に変動の大きいパラメータを優先的に未知変量とする、という基準により、未知変量とすべきパラメータの優先順位を決定した。さらに、数値実験の結果から、各パラメータを多項式表現したときの望ましい次数と利用可能なGCP数の関係を明らかにした。

(2) 標高と走査角による幾何補正手法

従来のAVHRR 画像の幾何補正では、地形起伏まで考慮することはなかった。しかし、ヒマラヤ地域のように標高が高いところでは、幾何補正済画像を重合させたときにずれが起こる。図3はどの程度の標高差まで地形効果が無視できるか、すなわち、隣の画素として誤撮影されずにすむかを調べたものである。衛星直下の地上分解能にほぼ等しい1.1 kmの画素サイズで幾何補正した場合を想定して、地形効果の無視できる標高を計算したのが図3中の '1.1km mesh' である。これによれば、走査角の増加と共に許容可能な標高は減少し、30°では約1.6 km、40°では約1.0 km、50°では約0.6 kmとなる。次に、ヒマラヤの8,000 m級高地が何画素ずれて撮影されるかを調べてみた。その結果が図4である。これによれば、走査角30°程度でも約5画素の誤差が生じており標高の影響が大きいことがわかる。ちなみに、走査角30°の場合に3,000 m級の山地で約2画素、5,000 m級で約3画素であった。

以上の検討により、画質の低下が顕著な観測端の画像を用いずに、走査角30°~35°程度までの画像を利用するとしても、標高の高い地域では無視できにほど画像が歪んでいることが明らかになった。そこで、(1)で開発した幾何補正法の再配列部分に標高データを組込んだ。すなわち、出力座標値、緯度経度、地球中心座標、原画像の(ピクセル、ライン)と順次変換してゆく一連

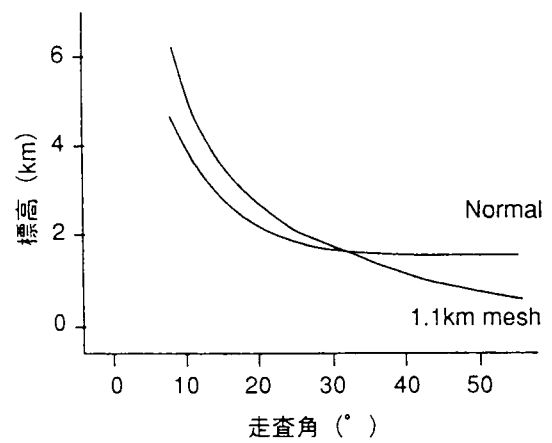


図3 走査角と無視可能な標高

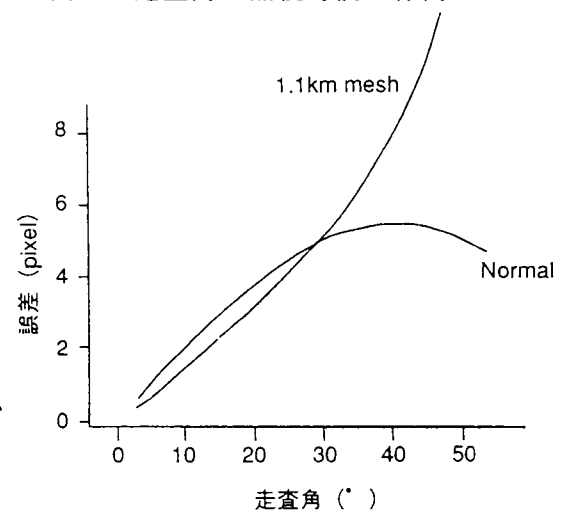


図4 標高8,000m地点の撮影誤差

の過程のうち、緯度経度から地球中心座標への変換において標高値を考慮した。標高値のデータソースとしては、地球全体を緯度経度方向各5分メッシュ（赤道付近で約9.3 kmに相当）に分割した標高データであるETOPO5を利用した。

既存の方法では再配列に4点補間法を利用し、小領域の最適サイズを縦横比及び面積で既定していた。しかし、先の走査角の検討結果、標高値の精度は高々0.5 kmもあれば十分であることがわかったことから、ETOPO5を用いるにあたって、小領域のサイズは縦横比をほぼ1、面積をほぼ $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ となるように改良した。

3. 放射性補正法の開発（東京大学工学部）

（1）太陽高度に基づく放射量補正手法

地表面の放射照度は観測時の太陽高度に依存する。つまり、観測時刻や地球曲率により場所が異なれば放射照度が異なる。従って、モザイク画像の作成や植生指数の計算を精度良く行うには補正を要する。ここでは、地表面をランバート面と仮定し、

$$A = (S \cdot C + I) / \cos Z$$

によって、太陽高度による放射照度の違いを補正することを検討した。ここで、 A は補正済みの放射輝度値、 S 、 I はアルベドへの変換係数、 C 、 Z はそれぞれ原画像の放射輝度値と太陽天頂角を意味する。曲率による影響は対象地域を等緯度と仮定した。

（2）モザイク作成手法の自動化

モザイク画像の作成には高度な幾何補正が必要であるが、隣接画像を精度よく重ね合わせるにはシーン補正が不可欠で、それには両画像上での対応点の選定が必要である。精度は選定される対応点の数に依存するが、人手でこれを行なうのは効率と精度に問題がある。ここでは対応点の選定を自動化することによって精度と効率の向上を図るとともに、空間特徴の顕著でない内陸部の対応点の探索もできるようにした。

開発した手法は、重複する2画像のうち、一方を基準画像とし、基準画像上の重複部分を正方形小領域に分割し、領域内の輝度の空間分布が最も似ている同面積の小領域を他方の画像上で見いだす方法である。

これらの手法を適用して、東経 $70^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 、北緯 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ のインド半島を含む東南アジア地域について、同じ月で観測日の異なる4枚の画像を基にモザイクを作成したのが図5である。海岸線だけでなく内陸部分においても接合部分の不連続性はほとんど見られず良好な接合が行なわれている。また、重複領域からの雲域の除去も安定して行えることを確認した。

（3）植生評価を目的としたセンサの分光特性の評価・設計

高分解能分光センサを用いると対象の分光特性が詳細に得られるため、



図5 NOAA AVHRRモザイク画像

植物の活性度の違いによる分光特性の差異を検出することができる。これに対し、遠隔計測用センサでは、できるだけ少数のバンド数でその差異を検出できることが望ましい。ここでは、活性度が異なる植物のサンプルを高分解能センサを用いて観測して得られたデータ（分光特性）から、少数のバンド数で差異を知ることでできるセンサの分光特性を定めた。特に精度良く知りたい活性度の違いを優先的に検出できるセンサの特性を決定した。処理手順を以下に示す。

- ① 高分解能センサで得られた高次元の分光データを主成分分析により直交化して圧縮し、低次元のデータで表現する。
- ② 活性度ごとのクラス内分散の共分散行列が単位行列になるように分散を正規化する。
- ③ 活性度間の判別の重要度を考慮し、優先的に検出すべき対象を定める。
- ④ 定められた優先度に従って、目的とするセンサの分光特性を逐次的に決定する。

成育段階が異なり活性度が異なる植物の葉（5種類）を分光分解能が約2nmの高分解能分光センサで観測し、分光反射率（500次元）を求めた。図6に示した5種類の分光反射率で表される活性度の異なる対象のうち、対象Cを他から優先して分離する場合を想定して求めたセンサの第1、第2の分光特性を図7示す。得られた特性は分光センサが各波長に与えるべき重みを意味している。

4. 植生分類手法の開発（岩手大学工学部）

（1）多時期のAVHRR 画像を用いたNDVI値の観察

東南アジア地域の1989年12月から90年2月にかけて収集された計7シーンのAVHRR 画像について、都市、森林、耕作地、草原、砂漠、雪氷原など、合計18のテスト領域をとり、バンド1及びバンド2の画素値及びNDVI値を調べた。また、有効な画像の数が限定されていたため、事例を増やす意味から、日本で受信されているAVHRR 画像の中緯度帯の大陸部分についても同様の解析を行った。その結果、都市、砂漠、雪氷原などは、画像によってNDVI値はあまり変化しないが、森林、耕作地及び草原では近接した日に収集された画像の間でも変動の大きいことが判明した。前3種は比較的NDVIの小さい地表被覆種目であり、後3種はNDVIが大きい種目である。NDVI値の変

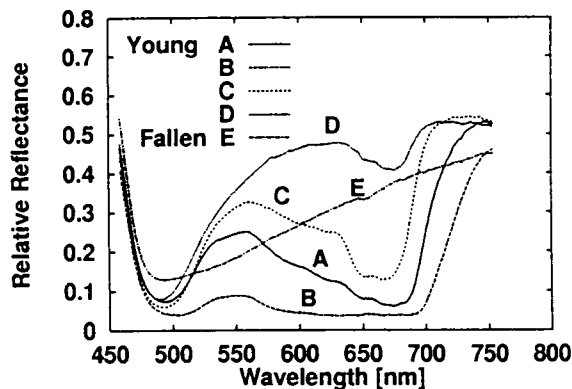
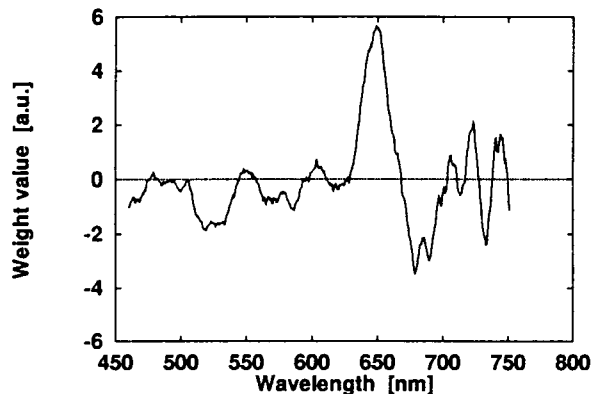
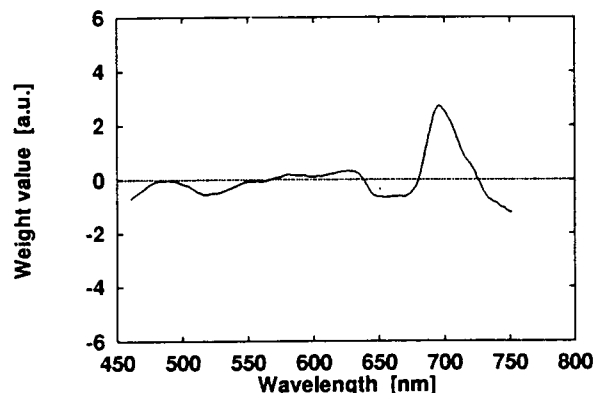


図6 植物の葉の分光反射率



(a) 第1の分光特性



(b) 第2の分光特性

図7 対象Cを分離するための分光特性

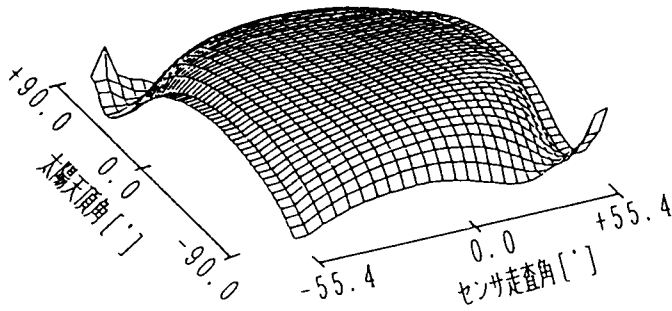


図8 視程23kmのエアロゾル濃度のTR
下における高植生密度地域の衛
星からみたNDVI値

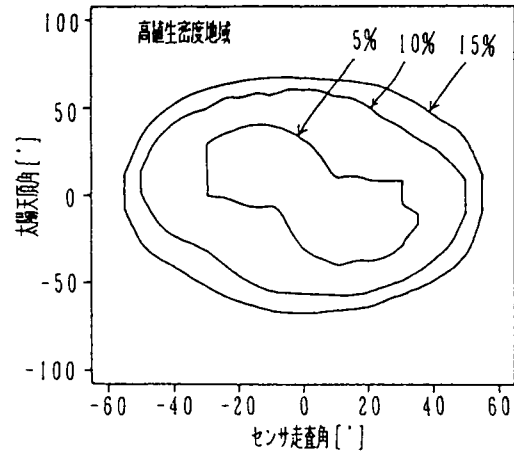


図9 視程23kmのエアロゾル濃度のTR
下における高植生密度地域の衛
星NDVI値の相対誤差

動には、Sun-Target-Sensor-Geometry (STSG) 効果を含めた観測時の大気組成が影響しており、精度の高い植生情報を得るためには、大気効果及びSTSG効果の検討が重要であることがわかった。

(2) LOWTRAN-7を用いた大気効果及びSTSG効果の究明

シミュレーションプログラムLOWTRAN-7を用いて、種々の大気状況及びSTSG条件下でのAVHRRのバンド1及びバンド2に関する検討を行った。図8は視程23kmのエアロゾルをともなったTRのもとで、高植生密度地域（NDVI値は0.86）を種々の太陽天頂角及びセンサ走査角で見たときのNDVI値のシミュレーション結果である。太陽天頂角は日出から南中時刻までを負、南中時刻から日没までを正としており、またセンサが北半球を観測しているものとして、走査角度は下点の西側を正、東側を負として記述している。図9は図8の結果をもとに、衛星で検出されるNDVI値が地表でのNDVI値（0.86）に対して、5%、10%、15%の誤差を示す太陽天頂角とセンサ走査角の範囲のプロットしたものである。この場合衛星によるNDVIは地表のNDVIよりも小さい値を示すものとなっていた。相対誤差が5%以内で観測できる太陽天頂角及びセンサ走査角の範囲は非常に限定されたものとなっている。他の地表被覆物及び大気条件の組み合わせについてのシミュレーション結果を総合したところ、衛星NDVIには、エアロゾル濃度が大きいほど、NDVIが大きいほど、大気の水蒸気量が大きいほど、衛星からみたNDVIの誤差が大きいことが判明し、適切な大気効果の補正法が必要であることが判明した。

(3) 大気モデルを用いたNDVI補正

大気モデルの導入によりパスラジアンスを計算し、これをもとにNDVIを補正する手法を提案した。図10は、視程23kmのエアロゾル濃度のTRの下で、高密度植生地域の補正NDVI値を調べたものである。また図11は、補正NDVIの相対誤差の等値線を示している。図8及び図9の場合に比べて補正NDVIでは誤差が大きく改善されていることがわかる。他の地表被覆条件及び大気条件においても、補正NDVIの優良性が判明した。

この手法を実利用にするためには、(1) 観測の地点の緯経度が既知であること、(2) 観測の年月日と時刻が既知であること、(3) 大気モデルが既知であること、が必要である。このうち項目(3)について、一般にAVHRR 画像収集時の大気モデルを完全に知ることは困難である。大気中の

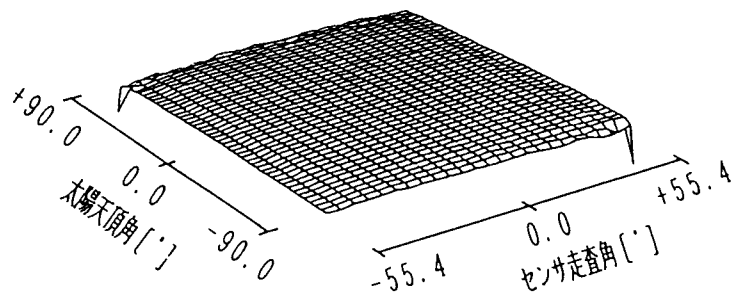


図10 視程23kmのエアロゾル濃度のTR
下における高植生密度地域の衛
星からみた補正NDVI値

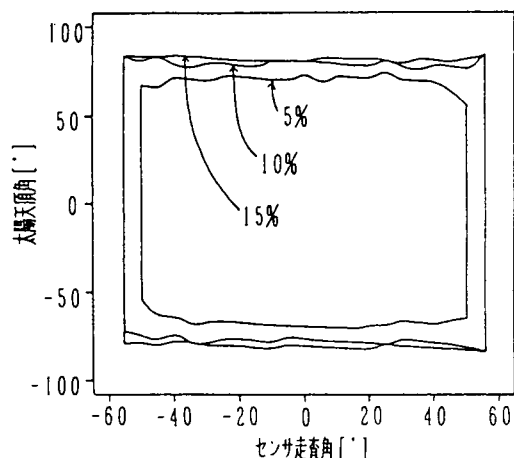


図11 視程23kmのエアロゾル濃度のTR
下における高植生密度地域の補
正NDVI値の相対誤差

可降水量については、AVHRR のバンド4とバンド5の輝度温度の差をもとに推定する方法が提案されているが、エアロゾル濃度に関しては、現在のところ観測事例の蓄積が少なく、補正に利用できる適当な方法は見当たらない。

5. NOAA AVHRR画像からの東南アジアモザイク画像、植生指数画像の作成（国立環境研究所）

NOAA AVHRR LAC画像を基に、東南アジア地域のモザイク画像ならびに植生指数画像を作成した。作成の手順を以下に示す。幾何補正、放射量補正については、2、3節に示された手法を基に、システムの簡略化の視点からさらに変更を加えた。

放射量補正： NOAA NESDIS より購入したAVHRR LACデータの各画素の値を、放射輝度の補正を行い反射率（バンド1，2）及び輝度温度（バンド4，5）に変換した。補正には、観測時の太陽天頂角、センサーのゲイン、オフセットを用いた。また、センサーの走査角の違いによる放射輝度の補正を行った。

幾何補正： 放射量補正された各画像に対し、AVHRR LAC データに格納されている位置情報を基に、各画素を緯経度座標に変換、さらにランベルト正角割円錐図法（標準緯線は 5°50' N 及び 29°10' N ）により地図投影を行った。

モザイク処理： 放射量補正、幾何補正された各画像を接合し、全域をカバーするモザイク画像を作成した。接合の際には、隣接画像間の位置ズレを微調整した。また複数画像の重なる領域では、画素毎に後述の正規化植生指数及び熱赤外バンドの値を用いて雲のない画素を選択した。

植生指数の算出： モザイク画像の各画素に対して、バンド1、2の画素から算出された反射率 A_1 及び A_2 を基に正規化植生指数（CVI）を以下の式により求め、植生指数分布図を作成した。

$$CVI = 260 \times (A_2 - A_1) / (A_2 + A_1) + 15$$

図12上段には、1986年度（1985年12月～1986年3月）、1990年度（1989年12月～1990年3月）、1993年度（1992年12月～1993年3月）の各乾期に収集されたNOAA AVHRR LAC画像を基に作成した東南アジア地域の植生指数図を示した。なお、1986年度、1993年度の画像は、本研究の成果に基づき地球環境研究センターのモニタリング業務の一環として作成されたものである。

6. 土地被覆改変状況の評価（国立環境研究所）

（1）植生指数の変化

図12上段に示された各年の植生指数の変化から土地被覆（植生）の変化を評価することを試みた。各年次の植生指数は、前節に示されたように、センサーのゲイン、オフセットの変動、太陽天頂角の違い等を補正した上で算出されている。しかしながら、実際のデータでは、ほとんど経年変化の無い砂漠地帯や原生林においても、植生指数が年次によって変化しており、その比較が困難であることが判明した。

ここでは、まず、ほぼ地表面の状況が変化していないと考えられるインド西部のタール砂漠及びミャンマーの森林地帯の植生指数を、それぞれ各年次の最低植生指数（0）及び最高植生指数（255）の基準値とし、各年次の植生指数の画像を基準化した。次に、各年次間の植生指数画像の差画像を算出し、その変化を調べた。

図12の下段には、それぞれ1986年度～1990年度、1986年度～1993年度、1990年度～1993年度の植生指数の差画像を示した。各図において、画像の濃度が白い程変化が大きいことを示している。各図面において、海岸線沿いに白い部分（変化の大きい部分）が見られ、沿岸域の地表面の変化が激しいことが示されている。なお、1986年度のデータにおいてベトナムからタイにかけて目視では判別できない薄雲が覆っていたため、植生指数値が低くなっており、差画像においても誤差となって表れている。

（2）スペクトル特性変化による土地被覆変化抽出手法の検討

地表面被覆の変化を精度よく捉えることを目的として、植生指数による変化抽出に加えて、衛星画像のスペクトル特性の変化から地表面被覆の変化を抽出する手法について検討を行った。ここでは、異なった年次の画像各画素のスペクトル特性（波形）を比較する方法として、主成分分析法、波形相関法を試みた。後者は、非線形演算で、線形演算である前者に比較し変化の検出感度が高い利点があることが判明した。一方、AVHRRではバンド1、2、3の3バンドのみしか利用できず、またバンド3が地表面からの放射による影響が強いため必ずしも反射スペクトル特性の比較とまらないなど問題点も明らかとなった。

また、一般的に、1年のうちの乾期1時期のデータの比較のみでは、撮影時期の違いによる影響を受けるため植生等の短期的変化と長期的変化の区別が難しく、1年のうちの複数季節のデータの使用が必要であることが判明した。

7. 研究の成果とまとめ

本研究により、東南アジア地域全体をカバーしかつ1kmの解像度を有するNOAA AVHRRモザイク画像及び植生指数分布図の精度が一段と向上するとともに、定常的に安定して作成できるようになった。改良、開発した手法は、幾何補正、放射量補正、植生分類、変化抽出など前記の画像、主題図作成ならびにその解釈のための一連の手続き全般に及んでおり、それぞれの寄与が相乗的に作用し精度の良い最終出力に結びついた。

ここで作成された画像、地図は従来にない精度とカバー領域を有していることから、地球規模の植生監視に適している。地球環境研究センターでは、モニタリング業務の一環として、本研究で確立した手法によりモザイク画像及び植生指数図の定期的作成を実施している。

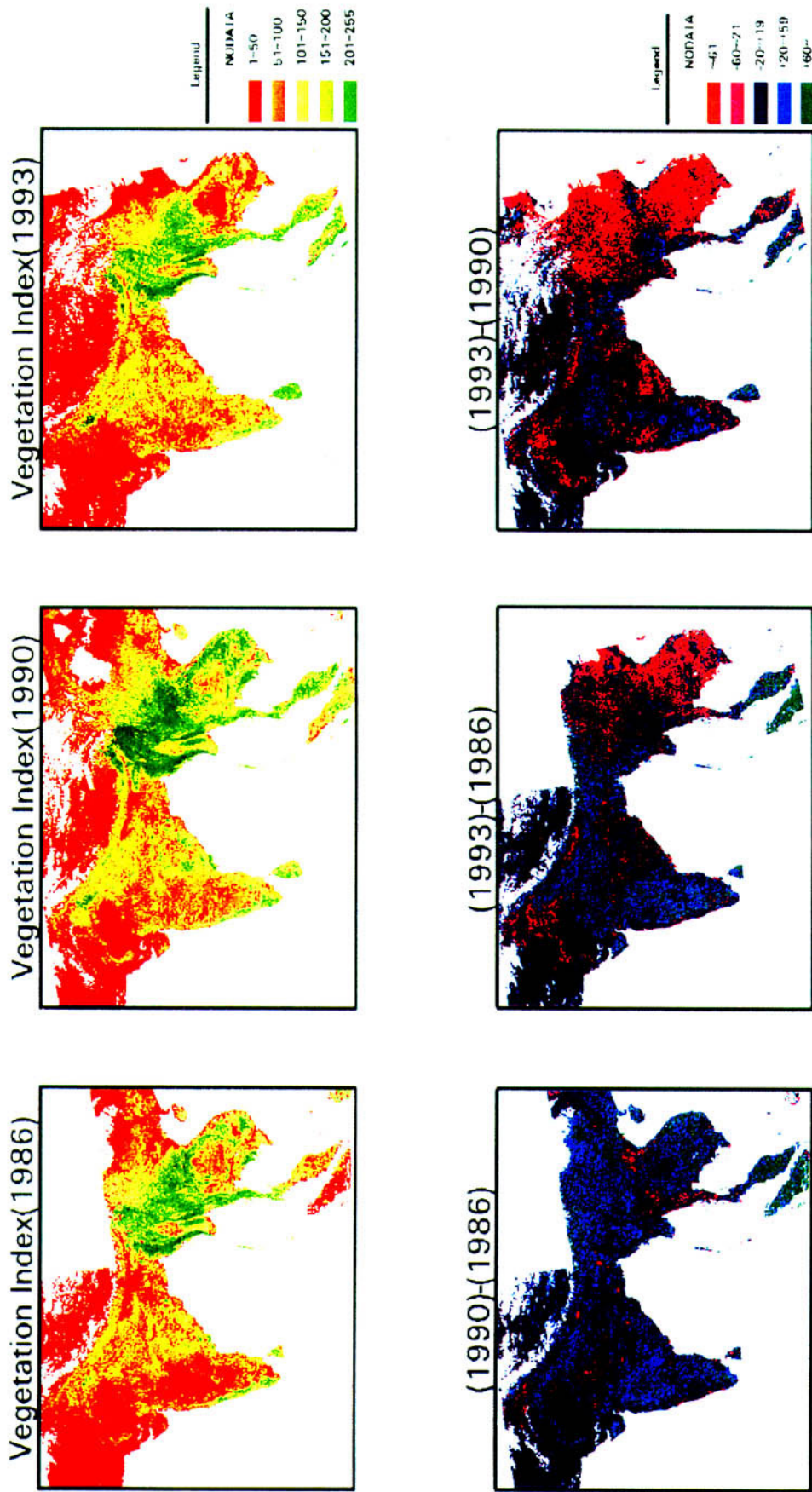


図12 東南アジア地域の植生指数図及びその変化図
 (上段：植生指数図 1986年度、1990年度、1993年度、
 下段：植生指数変化図 1986-1990年度、1986-1993年度、1990-1993年度)

8. 研究発表の状況

- 1) 橋本俊明・村井俊治、1991、GCPが少ないときのNOAA AVHRR画像の幾何補正、日本写真測量学会平成3年度秋期学術講演会発表論文集、pp. 183-188.
- 2) T. Hashimoto and S. Murai, 1991, Orientation of NOAA AVHRR Imagery with few GCPs, Proceedings of the 12th Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, pp. p-4-1 - p-4-5.
- 3) 橋本俊明・村井俊治、1992、操作特性を考慮したAVHRR 画像のモザイク作成、日本写真測量学会平成4年度秋期学術講演会発表論文集、pp. 5-8.
- 4) 泉田・丹波・横山、1992、標高が大きい領域についてのNOAA/AVHRR画像の幾何学的歪み補正、日本リモートセンシング学会第13回学術講演会論文集、pp. 65-68.
- 5) 安岡善文、1992、地球環境問題と情報システム（特別講演）、土木学会情報システムシンポジウム予稿集、pp. 171-183.
- 6) 橋本俊明・村井俊治、1993、地上基準点数に応じたNOAA AVHRR画像の幾何補正、写真測量とリモートセンシング、Vol. 32、No. 5、pp. 13-18.
- 7) 泉田利行、1993、人口衛星NOAA/AVHRR画像の幾何学的歪み補正一貫処理システムの開発に関する研究、岩手大学工学研究科大学院修士論文.
- 8) 里見知俊、1993、NOAA/AVHRRデータを用いた植生監視に関する研究、岩手大学工学研究科大学院修士論文.
- 9) Y. Yasuoka, Y. Yamagata, S. Otoma, T. Miyazaki and S. Takeuchi, 1993, Vegetation Mapping and Change Analysis in South-East Asia from NOAA AVHRR LAC Imageries, Proc. of IGARSS' 93, pp. 1683-1684.
- 10) 花泉・竹崎・藤村、1993、衛星遠隔計測データを用いた広域植生分布のモニタリング（モザイク画像の高速・高精度化）、第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集、pp. 643-644.
- 11) 喜安・藤村、1993、高次データからの逐次的特徴抽出とカテゴリ分類精度、第54回応用物理学会学術講演会予稿集、No. 1、p. 39.
- 12) 喜安・藤村、1993、高次元分光データからの逐次的特徴抽出、計測自動制御学会第19回リモートセンシングシンポジウム講演論文集、pp. 101-104.
- 13) S. Kiyasu and S. Fujimura, 1993, Successive Feature Extraction from Hyperspectral Data, Proc. of IGARSS' 93, Vol. 2, pp. 465-467.
- 14) 里見・沢田・横山、1994、NOAA/AVHRRデータによる補正NDVI分布画像の合成、生研フォーラム「宇宙からの地球環境モニタリング」論文集、pp. 153-162、東京大学生産技術研究所.
- 15) Y. Yasuoka, 1994, NOAA AVHRR 1km Landcover Classification in South-East Asia, IGBP Workshop on a Strategy for a Fast-Track 1km Global Landcover Classification.
- 16) Y. Yasuoka, T. Tamura and Y. Yamagata, 1994, Application of Remote Sensing to Environmental Monitoring - Global Wetland Monitoring, Third International Conference of the International Society on Optics Within Life Science, p. 34.