

地球観測衛星データの環境分野における利用 —地域スケールの衛星リモートセンシング—

福岡県保健環境研究所 大久保 彰人

1. はじめに

1972年のERTS-1衛星（後にLandsat-1と改名）を本格的な始まりとして、地球環境監視や資源探査などを目的に、多くの地球観測衛星が打ち上げられている。地球観測衛星は、広い地域を反復して観測しており、その過去からのデータは、デジタル化され保存がなされている。最近では、衛星からの多角的な観測により、データの種類も多くなり、さらに、データ価格も安価になってきている。

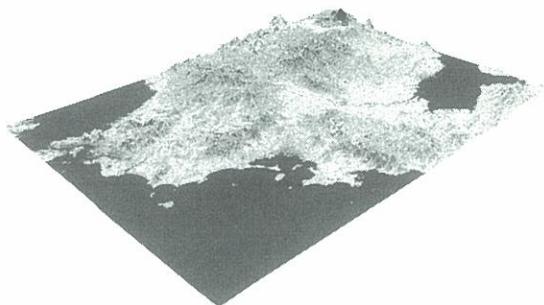


図1 福岡県域の鳥瞰図
(Landsat-5 MSS, 1982.5.20)

この人工衛星からの地球観測技術は、リモートセンシングと呼ばれており、著者は、福岡県域を範囲（図1）として、土地被覆分類、土壤水分および温室効果ガスの吸収源に関する地域スケールの解析¹⁾を行ってきてるので、それらについて述べる。

2. リモートセンシングの原理

リモートセンシングとは、遠隔から非接触で対象物を同定したりその性質を計測する技

術である。その原理は、「すべての物体は、異なる電磁波に対して、物質固有の反射または放射の特性を有する」という物体のスペクトル特性に基づいている。

リモートセンシングをその観測波長帯域の違い（図2）の面から、可視・近赤外、熱赤外およびマイクロ波のリモートセンシングの3つに分けることができる。

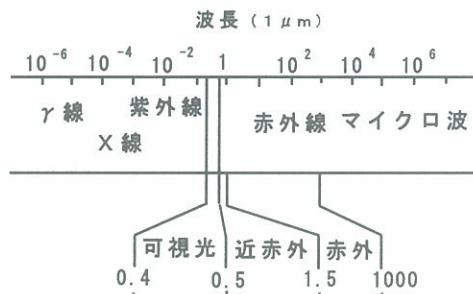


図2 電磁波の波長帯

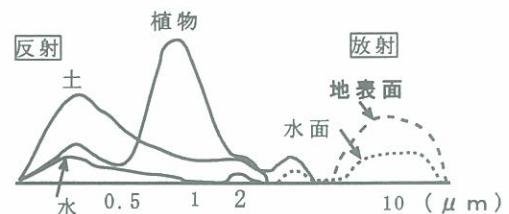


図3 物体の電磁波の反射と放射

可視・反射赤外リモートセンシングにおいては、放射源である絶対温度6000Kの太陽が波長500nmをピークとする電磁波を放射して

おり、その地表面で反射された分光特性を、大気を通して衛星のセンサで計測する。いろいろな波長に対する物質固有の反射特性を利用して、地表面の反射情報から特徴抽出を行っていく（図3）。

熱赤外リモートセンシングは、常温300Kの地表面が放射源である。波長 $10\mu\text{m}$ をピークとする電磁波の放射がある。衛星のセンサで観測する放射エネルギーは、物体の温度と放射率によって決まる。

マイクロ波リモートセンシングでは、放射源が地表物体（受動的に観測）の場合とレーダ（能動的に電波を発生する）の場合とがある。能動方式のマイクロ波レーダでは、地表面に向け照射された電気エネルギーの散乱が、対象物体の電気的性質と形状により、レーダ側にもどってくる散乱強度（後方散乱係数）を計測している。

3. 環境分野における利用

オゾン層の破壊、温室効果ガスによる温暖化、酸性雨、熱帯雨林の減少、砂漠化、海洋汚染などの地球環境の監視において、大気、陸域および水域におけるいろいろな観測項目がある（表1）が、その空間的な分布に関する情報収集にリモートセンシングによるデータ収集が期待されている。

このような地球規模の現象とは別に、自治体のような地域スケールでの適用もあり、いくつかの解析例を列挙する。

基本的で最も活用されるものに、土地被覆の解析がある。過去の衛星データと比べて、土地被覆の改変によって緑地が減少した場所を特定したり、広域的に捉えることが行われている。著者らの土地被覆分類の解析もあとで取り上げる²⁾。

表1 環境分野の観測項目

大 気	陸 域	水 域
オゾン濃度	バイオマス	容存CO ₂
CO ₂ 濃度	土地被覆	プランクトン
黄砂	地形と地質	クロロフィル
エアロゾル	植生活力	濁度, SS
気温, 湿度	土壤水分, 蒸発散	水温
水蒸気量	野生生物棲息域	海面高度
日射量	地表面温度	波浪
逆転層高度	放射収支	アオコ
雲量と雲厚	日射と降水量	赤潮

植生の分類では、福岡県北西部を対象としてランドサットMSSデータから植生分類図を作成した研究³⁾があり、常緑広葉樹林、落葉広葉樹林といった相観レベルの分類において、80%以上の正答率が得られた。

植生の大気浄化効果について、大阪府でNO₂吸収量の試算を行い、市街地の緑化が、周辺の大気環境保全に効果があることを示している例⁴⁾がある。

閉鎖性水域での水質（透明度）としては、岡山県児島湖において、衛星の飛来に同期した調査船による水質測定データと衛星データとの間で相関解析を行った例⁵⁾がある。また、クロロフィルa、透明度、SSおよび水温の推定分布図も作成している。

地表面温度計測では、東京都を対象とした地表面温度の経年変化解析の例⁶⁾がある。1984年と1994年で、真夏の夜間の地表面温度を比較解析している。熱赤外バンド値を補正して、市街地化による周辺部への高温域拡大を画像化している。

騒音の予測は、大阪府でランドサットデータを使った研究例⁷⁾がある。MSSおよびTMのデータを用いて、反射率のメッシュ平均値

等からメッシュ別建物面積率を求める。そこで計算される騒音伝搬係数とともに、メッシュ別の騒音レベルを求めて、騒音センターを描いている。

野生生物の生息域推定に関連した例として、北海道のエゾシカ生息地の解析⁸⁾がある。衛星データおよび地理情報を用いて、3次元の地形モデルを作り、エゾシカの生息地や経路解析を行っている。野生生物の保護管理施策支援が目的である。

その他、海洋油汚染のような即時に結果が求められる利用、地理情報を用いる環境情報システムと連携した利用⁹⁾など、異なる適用場面もみられる。

4. 土地被覆分類

これから以降は、著者らが行った解析例について紹介していく。

まず、人工衛星からの複数の波長によるデータを判別して土地被覆分類図を作ることは、陸域の解析で基本的な問題である。

そこで、土地被覆分類図を作成するとともに、その分類結果の検証を行った例²⁾をとりあげる。この解析は、環境アセスメントの基礎資料として、過去からの土地被覆の経年変化を捉えることが目的であった。北九州市小倉南区を大部分とする対象地域において、Landsat - 5 TM (観測日 1990年9月21日) のデータを用いた。画像分類を行った画像は、対象地域を含む地域であり（図4）、トレーニングデータは、カテゴリー別に20点ずつ取得した。次に、主成分分析により集約された3主成分の画像に対して、教師付分類であるマルチレベルスライス法によって、画像をカテゴリーに分類した。

土地被覆分類の結果でカテゴリー別計測を

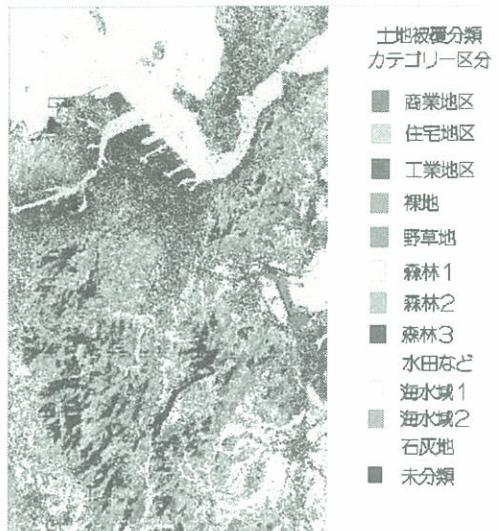


図4 土地被覆分類図

行ってみると、商業地区、住宅地および工業地区のような都市的な土地被覆は26.2%，森林は30.6%，水田が22.5%，野草地14.7%であった。この分類結果に対して、自然環境保全基礎調査の現存植生図および国土数値情報1/10細分メッシュ土地利用データとの比較を行って、衛星データによる分類の妥当性を確認することができた（表2）。

この分類結果のなかで、経年変化があった場所を特定するために、1975年の土地利用図と衛星データによる分類画像とを、重ね合わせてみた。そして、経年的に、森林、水田などから都市的な被覆（商業、住宅および工業地区）に変化している場所を抽出してみると（図5），既成の市街地および住宅地に続いて、新規の開発が広がっていった様子がうかがえた。そして、その周りで現地調査を行って、分類結果が妥当であることを確認した（図5）。

表2 主なカテゴリにおける衛星データによる分類と既存情報との比較

カテゴリ	土地被覆	現存植生図	土地利用図
商業地区			
住宅地区	26.2%	26.0%	32.3%
工業地区			
森林	30.6%	31.2%	30.6%
水田	22.5%	24.0%	21.5%

注1) 東経130度52分30秒～130度58分00秒、北緯33度48分00秒～33度52分00秒

注2) 現存植生図および土地利用図は、土地被覆分類の相当するカテゴリに統合して計算した。



図5 土地被覆の改変と現地調査地点

次に、ニューラルネットワーク法において、新しい手法を開発して行った分類をとりあげる¹⁰⁾。モデルの構造(図6)は、入力層から衛星データ(入力ベクトルx)が入り、途中の結合荷重(ベクトル V_j , W_i)やしきい値(ベクトル η_j , θ_i)で決まるネットワークを経て、出力層の分類カテゴリ(出力ベクトルy)へ流れしていく。関数fとgは、ニューロンのモデルで用いられる非線形の入出力関数である。以上のモデルを、内積・を用いて式表現すると、次のとおりである。

$$y_i = g(W_i \cdot f(V_j \cdot x - \eta_j) - \theta_i)$$

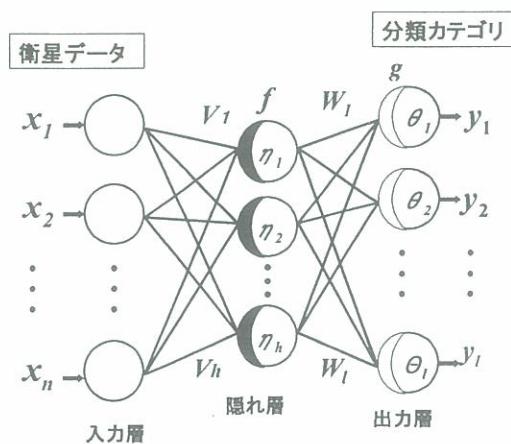


図6 ニューラルネットワークの構造

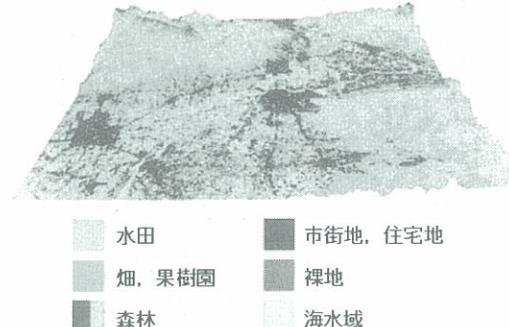


図7 ニューラルネットワークによる分類

この方法(LDR法)¹⁰⁾では、サンプルの衛星データがなるべく良く判別されるように、つまり入力層空間における分類カテゴリに対応する認識領域がなるべく大きくなるように、ネットワークを決定する。それを表現する評価関数を最小化して、結合荷重やしきい値を求めていく過程が、その学習アルゴリズムになる。LDR法による分類結果の例を図7に示す。このLDR法は、統計的な手法でないために、分布の仮定を必要としないところに特徴がある。

5. 土壤水分

土壤水分は、降雨、浸透、流出、蒸発散などの水文過程のパラメータだけでなく、気候変動に係わる要因でもある。

土壤水分の解析では、マイクロ波の合成開口レーダSAR（図8）を使う解析が試みられている。ここでも、ERS-2（Cバンド、5.3GHz）およびJERS-1（Lバンド、1.275GHz）のSARデータを用いた。SARは全天候型のセンサーであり、安定したデータ取得が可能である。また、地形効果や透過性の特徴を持つおり、光学センサとは異なった情報が得られる。



図8 合成開口レーダによる画像
(ERS-2 AMI, 1997.1.17)

表3 衛星データ

人工衛星	センサー	観測年月日
SPOT2	HRV(P)	1997.1.17
SPOT2	HRV(XS)	1997.1.17
Landsat - 5	TM	1994.3.31
ERS - 1	AMI(SAR)	1997.1.17
JERS - 1	SAR	1997.1.17
JERS - 1	SAR	1997.1.18

対象地域を筑紫平野として、複数の衛星に

よるデータ（表3）を利用して、衛星飛来に合わせた現地調査における採取土壌の含水率も計測して解析した^{11), 12)}。



図9 フーリエ変換による地表面粗度



図10 地理情報による斜面の寄与

電波の散乱には、地表面の粗さ、斜面の傾き、植生の影響がある。この研究では、これらの影響を、衛星データから広域に推定した。地表面粗度は、SPOT衛星のパンクロデータ（解像度10m）から、地形変化の周期成分を、フーリエ解析によって推定した（図9、明るい所が粗度が大きい）。また、斜面の傾きを、国

土数値情報の標高データから、解像度50mで推定した(図10、明るい所が傾きの寄与が大きい)。

土壤の体積含水率 V_m を、SARの後方散乱係数 σ^0 、斜面の傾き $\langle e_1, e_2 \rangle$ 、地表面粗度(フーリエ解析のパワースペクトル) C_k および植生指標NVIを用いて、線形の推定式(回帰式)を作成した。

$$V_m = f(\sigma^0, \langle e_1, e_2 \rangle, C_k, NVI)$$

実測値と推定値との散布図も妥当であった(図11)ので、この推定式による対象地域の土壤水分マップを作成した(図12)。

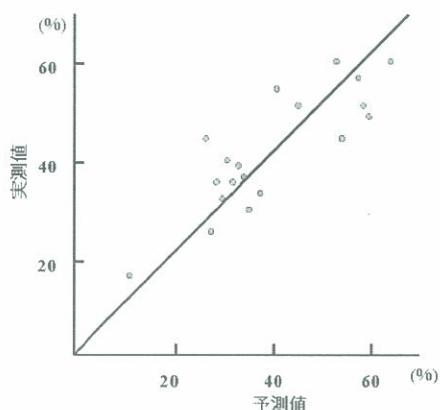


図11 土壤水分の推定値と実測値

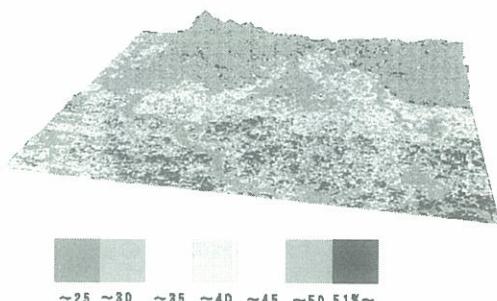


図12 土壤水分マップ

この解析について変数の寄与を調べると、マイクロ波の後方散乱係数は、ERS-2の場合

で有意な変数として取り込まれており、土壤水分の変動に対して、地形的な要因に続いて寄与することが、統計的な基準から示すことができた。

6. 温暖化対策のためのCO₂吸収源評価

二酸化炭素(CO₂)をはじめとする大気中の温室効果ガス(GHGs)による地球温暖化対策のなかで、森林によるCO₂固定量はまだ不明な部分が多い状況であり、植生の光合成によってとりこまれるCO₂の固定量を算定する方法を確立せねばならない。その手段として、人工衛星から地球を広域に観測するリモートセンシング技術の利用が期待されている。

このような背景のもとに、CO₂吸収源の予備的な解析として、マイクロ波のデータを用いて、どの程度まで森林変化の解析が可能なのか検討した。JERS-1合成開口レーダSAR(Lバンド)のレベル0データを用いて、季節変化及び経年変化による植生指標の変動を検出することを試みた。

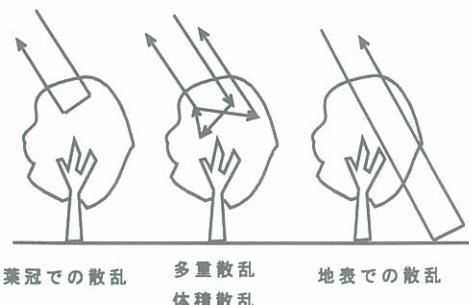


図13 マイクロ波の散乱

レーダ後方散乱のメカニズムを要約しておくと、夏の樹冠の発達により、Lバンドは透過率が減少して散乱強度は弱くなる。冬には、多重散乱や地表からの散乱成分も増して、後方散乱が強くなる(図13)。

対象地域は、福岡県南部の久留米市の市街地から耳納山地を含む東西に広い地域とした（図14）。その地域において、JERS-1 SAR レベル0およびLandsat-5 TMのデータを準備した。SARのレベル0データからは、複素画像であるSLC画像（位相情報の解析に用いるデータ）および実画像を生成した。

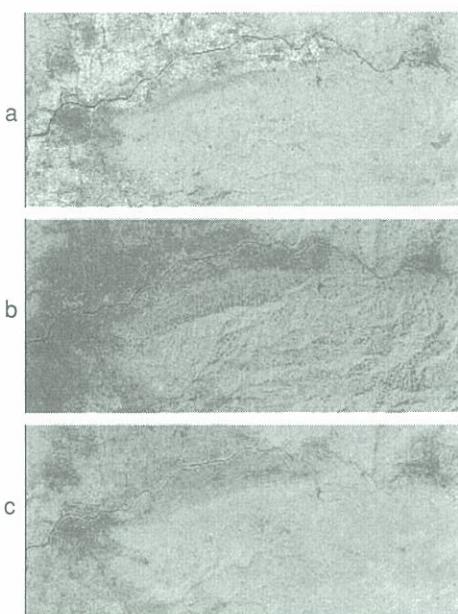


図14 正規化植生指標の画像化

a) 1988.4.15 b) 1991.12.4 c) 1998.4.27

Landsat-5 TMデータから、正規化植生指標NVI（=近赤-可視赤／近赤+可視赤）を計算した。このNVIの値を、0から255に画像化するとともに、解析にもそれらの値を用いた。大気補正を行っていないが、1988.4.15および1998.4.27のNVI画像は、平均が169.0および164.4であり、1991.12.4では、145.0であった（図14）。以下では、これらのNVI画像の画素値を、SARデータと比較しながら使用する。

まず、季節変化を見るために、1995.8.8お

より1998.1.4の2時期について、後方散乱の強度を表す画像（図15）を作った。その強度の変化パターンごとに、NVIの変化（図14）をみるために、後方散乱強度におけるa) \geq b) およびb) \geq a)のパターンを示す画素のグループごとに、NVIの平均値を計算してみた（図16）。すると、冬に散乱強度が増すb) \geq a)のパターンで画素数はもちろん多いが、a) \geq b)のパターンでややNVIが高くなっている、これは常緑的な樹種の影響であると推測された。

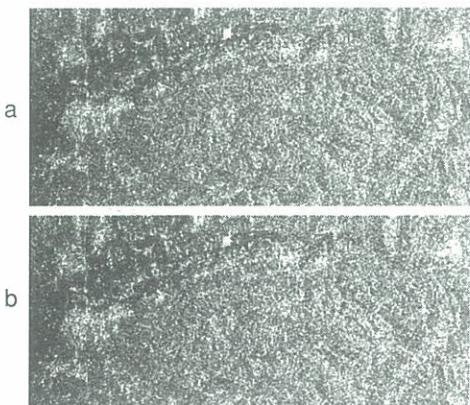


図15 SARの後方散乱の画像化

a) 1995.8.8 b) 1998.1.4

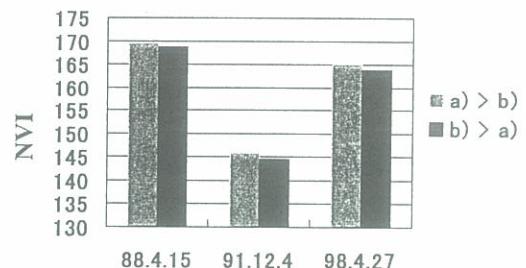


図16 パターン別のNVIの変化

次に、経年変化を見るために、1992.9.16, 1995.8.8および1998.8.12の3時期のSARデータについて、それぞれ後方散乱強度を表す画像（図17）を作った。

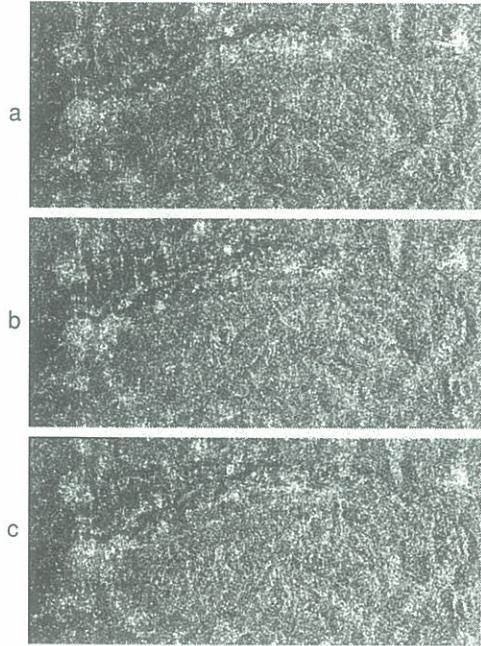


図 17 SARの後方散乱の画像化

a) 1992.9.16 b) 1995.8.8 c) 1998.8.12

3時期の後方散乱強度の大きさの順序を考えて、その経年変化のパターンの画素グループごとに、NVI（図14）の平均値を計算した。その結果、やや時期的に遅いa)で散乱が大きい落葉樹的な画素のグループで、NVIが他のパターンより減少が大きくなっていた。

さらに、SARデータの位相情報を利用したコヒーレンス解析について述べる。コヒーレンス γ は、2枚の複素画像の組に対して、その小領域（本稿の場合、 5×5 ピクセル）において相関をとったものであり、その値を0から255にスケーリングして画像化することができる（図18）。

$$\gamma = \frac{|E(c_1 c_2^*)|}{\sqrt{E(c_1 c_1^*) E(c_2 c_2^*)}}$$

ここで、 c_1 および c_2 は2枚の複素画像で同じ位置にある複素データ、*は複素共役、そ

して、 $E(\cdot)$ はその小領域における期待値を表す。このコヒーレンス γ は、2つの複素画像において振幅と位相が類似しているかどうかを示す指標であり、1に近いほど画像化したとき明るく変化の少ない場所であるといえる。

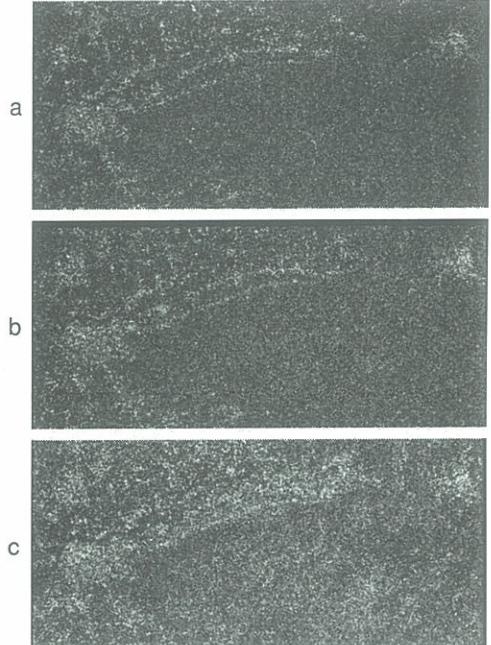


図 18 コヒーレンスマップ

- a) 1998.8.12 vs 1995.8.8
- b) 1998.8.12 vs 1998.1.4
- c) 1998.8.12 vs 1998.9.25

これらのコヒーレンス画像において、c)の1998.8.12および1998.9.25という1ヶ月程度しか違わない画像（軌道間距離307m）においては、画像全体にコヒーレンスも高く、それらの間では地表面に変化が少ないと示している。それに比べて、a)の1995.8.8および1998.8.12の場合（軌道間距離165m）には、森林域がc)の場合に比べて暗く、経年変化によるコヒーレントの低下が起きていると思われる。また、b)の1998.8.12および1998.1.4の場合（軌道間距離496m）には、季節変化

によるコヒーレントの低下が現れていると思われた。そこで、コヒーレンス γ を画素値に直して 50 以下の画素において、それぞれ植生指標 NVI の変化を求めた。コヒーレンスからみて季節変化を示している画素は、それらと同じ位置の画素のグループの NVI 平均でみると、経年変化の画素と比べて、1991.12.4 で少し低くなっていた（表 4）。

表 4 コヒーレンスによる NVI 変動

変化	88.4.15	91.12.4	98.4.27
季節	170.65	145.79	165.73
経年	170.48	146.10	165.71
両方	171.27	145.47	165.76
その他	167.59	144.30	163.17

以上のように、JERS-1 SAR のデータから、季節変化および経年変化による植生指標の変動を検出すると、SAR の後方散乱特性に対応した NVI の変動を、傾向としてとらえることができた。

ところで、以上の予備的な解析では数量の算定ができないので、光学センサによる吸収源評価の手がかりの 1 例を示しておく。地域レベルの植生の推定には、Landsat-5 TM の 30m 程度の解像度が適していると思われる。しかし、国レベルでの均一な処理となると、NOAA AVHRR のような刈り幅が広く観測頻度が多いデータが便利であると思われる（図 19）。これらの光学センサから、NVI を求めて、純 1 次生産性（NPP）を求める式が提案されている。

$$NPP = \frac{-1}{a \log_e \left[1 - \frac{NVI}{0.4} \right]}$$

ここで、NPP : gDW/m²/yr (年間あた

り 1m²あたりの乾燥重量), NVI : 年間の累積 NVI, a = -0.0006813 である¹⁵⁾。

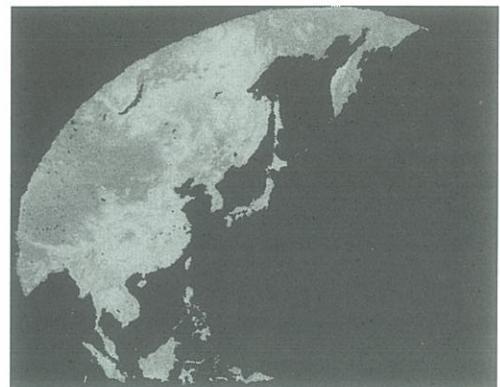


図 19 アジアの植生指数モザイク図¹⁴⁾

(NOAA AVHRR, 1996年5月)

表 5 純 1 次生産量原単位

熱帯林	森林	草地	半砂漠	砂漠
2,200	1,250	900	90	90

(単位 : gDW/m²/年)

また植生区分が分かれれば、植生別の純 1 次生産量原単位は、ホイタッカー (Whitakker) により求められている（表 5）。この表は乾重量であり、地球全体の面積において、炭素換算の固定量を算定すると、陸域で 52.3GtC/年と推定されている¹⁵⁾。

以上のようなアプローチに類した解析により、衛星データを用いて、地域スケールでの吸収源評価を行うことが課題である。

7. まとめ

リモートセンシング解析例として、土地被覆、土壤水分および森林の吸収源評価をとりあげた。現在の課題である衛星データによる森林の CO₂ 固定量の算定では、グローバルな環境観測とは異なる視点から、多種類のセンサを使って、きめ細かな解析を行う必要があ

ると考えている。

参考文献

- 1) 大久保彰人, 山崎正敏, 武末保彦, 原政直, 関口芳浩, 寺田弘慈, ”自治体での利用をめざした地域レベルのリモートセンシング”, 日本リモートセンシング学会誌, 19-4, pp.71-76, 1999.
- 2) 大久保彰人, 安岡善文, ”土地利用図との比較による土地被覆の経年変化解析について”, 日本リモートセンシング学会誌, 16-3, pp.65-76, 1996.
- 3) 奥田敏統・中根周歩：“ランドサットMSSデータの植生解析への応用－福岡県北西部の例－”, 日本生態学会誌, 38, p.85-97, 1988.
- 4) 小林正興・田口圭介・奥田毅・阿部恭司：“ランドサットデータを用いた植生によるNO₂吸収量の試算”, 大阪府公害監視センター所報, No.12, p.37-51, 1990.
- 5) 宮崎清・鷹野洋・安岡善文：“ランドサットTMデータによる児島湖及び周辺水域の水質分布測定”, 日本リモートセンシング学会誌, 11(2), p.191-193, 1991.
- 6) 稲永麻子・武内章司・長谷川泉：“ランドサットTMデータによる1984年～1994年の東京都の地表面温度変化と土地被覆変化”, (財)リモートセンシング技術センター, RESTEC, No.36, p.27-31, 1996.
- 7) 厚井弘志・藤田真一・青井一郎・笈西隆滋・田中秀穂：“ランドサットデータを用いた環境騒音の予測”, 日本リモートセンシング学会誌, 12(1), p.111-115, 1992.
- 8) 金子正美：“情報に基づいた自然環境保全施策の推進に向けて”, 日本リモートセンシング学会誌, 18-1, p.70-71, 1998.
- 9) 大久保彰人, 東公一, 前浜三四郎, 安岡善文, ”福岡県地理環境情報システムの機能と衛星リモートセンシング情報の活用”, GIS-理論と応用, 2(1), p.151-157, 1994.
- 10) A.Ohkubo and K.Niijima,”A new supervised learning method of neural networks and its application to the land cover classification”, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium,pp.1369-1371, 1999.
- 11) 大久保彰人, 高木潤治, 黒柳直彦, 波多江直之, 田村正行, ”衛星データと同期調査による広域土壤水分の推定”, 日本リモートセンシング学会誌, 19-1, pp.30-44, 1999.
- 12) 大久保彰人, 高木潤治, 黒柳直彦, 波多江直之, ”水文パラメータとしての土壤水分の推定手法に関する研究”, (財)福岡県産業・科学技術振興財団／自治体パイロットプロジェクト応用化研究報告書, 220pp, 1997.
- 13) 大久保彰人, 山之口勤, 田村正行, ”多時期SARデータによる植生指標変化の検出”, 日本リモートセンシング学会第29回学術講演会論文集, p.69-72, 2000.
- 14) 環境庁国立環境研究所地球環境研究センター, ”東アジア植生指数月別モザイク図1996年”, 1998.
- 15) 村井俊治, ”リモートセンシングからみた地球環境の保全と開発”, 東京大学出版会, 199pp, 1998.