

植生の観測

Observation of Vegetation

恒川 篤史*

Atsushi Tsunekawa

1. はじめに

植生の観測手法、すなわち植生のなにを、どのように観測するかは、当然のことながら、その目的と対応するように設定される。本稿では、とくにグローバルな植生を対象にし、(1) 植生型の分布の観測、(2) 気候モデルや地球生物化学モデルで用いられる生物物理量の観測、(3) 森林破壊や砂漠化などの植生変化の観測の3点について述べる。

2. 植生の概念と機能

2.1 植生にまつわる概念

生態学の分野では、植物群落の優占種の生活形(高木、低木、草本など)や密度・高さ・葉形などであらわされる様相、外観のことを相観(physiognomy)とよび、この相観や、そこに出現する植物の種類構成(種組成)、あるいは立地条件(生息地の環境)などから判断して、比較的均質な植物の集団を植物群落(plant community)という。また植物群集(plant association)とは、種組成にもとづく植物群落分類の基本単位で、一定の種組成、相観および立地条件をもつものをいう。

それに対して植生(vegetation)とは、とくに相観や組成、あるいは空間的なスケールについての基準を設けず、ある場所に生育している植物の集団を漠然とさす言葉であり、植被(plant cover)と同義で用いられる。

2.2 植生のもつ役割と機能

緑色植物は、光合成によって二酸化炭素を吸収し、酸素を放出する。このことによって長い地球の歴史のなかで、徐々に大気中の酸素濃度を上昇させ、光合成をおこなわない動物の重要な機能である呼吸にとって

適した環境が形成されてきた。同時に植生、とくに森林は地球上の炭素循環に大きく寄与しており、このことは地球温暖化問題を考える上でも重要である。また地表の熱収支や蒸発散、降水の流去等のプロセスにもかかわっており、気象・気候現象に及ぼす影響も大きい。

また人類にとっては豊かな植物資源の提供者としての役割も重要である。石炭、石油は太古に形成された植物資源であり、薪や炭とならんで人類のエネルギー資源は今でも過去または現在の森林に大きく依存している。また食料や建築材の多くも森林から得られ、われわれの生活を支えている。近年では、医薬品などの遺伝子資源の宝庫としてもその価値が評価されている。

2.3 空間スケールと観測手法

ここでは空間的な広がりを以下の四つのスケールでとらえてみよう。第一のスケールは「局地的生態系(local ecosystem)」であり、ランドスケープ・エコロジーの分野では、生態学的に比較的均質な空間としてとらえられている。第二のスケールは「景観(landscape)」である。これは局地的生態系の空間的な複合体、モザイクであり、局地的生態系が似たような形態で繰り返しあらわれる。第三のスケールは、「地域(region)」であり、これはひとつの大気候区に含まれると同時に、文化的、経済的、政治的な人間活動と結びついており、しばしば一定の空間的方向性・傾度をもってあらわれる。第四のスケールは「地球(globe)」であり、言うまでもなく私達人類と生物は少なくとも当分の間はこの地球上で生存していくことを余儀なくされている。このスケールでは、地球全体の物質・エネルギー循環はどのようにおこなわれているか、気候変動と植生変動との相互作用はどのように機能するか等々が主たる研究課題となる。

地上での調査・観測は、通常、局地的生態系または景観のスケールでおこなわれる。一方、地域または全球のスケールでは、地上での観測は「点」のデータに

* 東京大学大学院農学生命科学研究科助教授

〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1

過ぎず、それを空間的に補間しなければ「面」のデータにはならない。「面」の観測に威力を発揮するのが衛星リモートセンシングであり、今日、グローバルな植生観測の主たる手法となっている。

3. 植生型の観測

3.1 植生図化の手法

景観スケールでの植生分布は以下のような手順で地図化される。

(1) 植物社会学的植生調査：対象地域にみられるすべての植生タイプについて、おおよそ100~400m²程度の植分を対象として、高さの階層別に出現種、被度、群度等を記載する。

(2) 植物群落の識別：(1)で得られた植生調査資料をもとに、素表、常在度表、部分表、識別表という手順で、種と植分の組み換えをおこなう。この作業を通じて、種の結びつきを類型化し、その類型としての植物群落(植生単位)を識別する。

(3) 現存植生図の作成：識別された植物群落の種組成的特徴や相観的特徴などを用いて植生図作成指針をつくる。この指針にしたがって現地において各地点の群落を同定し、それを地図上に表現する。

このようにして作成された地図を「現存植生図」とよび、現在日本では5万分の1の現存植生図によって国土全域がカバーされている。

しかし、グローバルな植生図化の場合には現地調査がネックとなり、このような手法は現実的ではない。これまで世界植生図は、大きく三通りの手法でつくられてきた。

ひとつは生物気候分析から得られたもので、ホルドリッジのライフゾーンやケッペンの気候区分図がこれに該当する。これらは、気温や水分の指数を用いて、潜在的な植生型を決定し、分布を気候データセットから推定する。この手法は植生分類の一貫性という点ではすぐれているが、結果として表現される植生型は現在の気候条件から得られる潜在的なものである。

ふたつ目は、既存の植生図や空中写真などを合成してつくられたもので、マッシュズの植生データセットなどがこれに該当する。この手法には、オリジナルの資料間での植生分類の不一致、調査時期や空間精度のばらつきなどの問題がある。

三つ目は、衛星リモートセンシングによる植生図化であり、NOAA/AVHRRデータなどが利用されている。この手法は、地上での植生分類、すなわち種組

成あるいは相観などを基礎とした分類ではなく、後に述べるような主に植生の反射特性を利用した分類となる。すなわちこの手法にもとづく植生分類は、地上での調査とは異なる手法を用いる点に注意が必要である。一方、観測・図化の方法と植生分類の定義に関するあいまいさを排除することができる点ですぐれている。

上記の3手法のうち、ある特定の時期についての、グローバルな植生の状況を知るには三番目の、リモートセンシングによる調査がもっとも適していると考えられる。以下、その手法をより詳細に紹介する。

3.2 植生の反射スペクトルとその季節変化

植生のリモートセンシングではおもにスペクトル的な特徴とその季節変化を利用する。

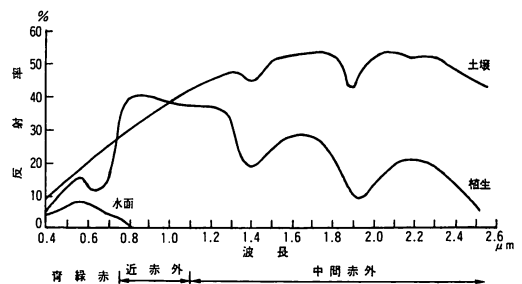
(1) 植生の反射スペクトル

図-1に、典型的な地上の地物の反射率曲線を示した。土壌や水面の反射率は可視域~近赤外域では比較的単調に推移している。一方、植生はやや複雑な曲線を示す。すなわち、0.4~0.5μm(青紫領域)および0.68μm近傍(赤領域)では吸収を示すが、これはクロロフィルやカロチノイドなどの光合成色素によるもので、その中間の0.55μm(黄緑領域)あたりでは吸収が小さい。0.75~1.3μm(近赤外領域)での強い反射はプラトーンとよばれ、健全な葉に特徴的なものである。また1.4μmおよび1.9μm(中間赤外領域)の吸収は水分によるものである。

このように植生は土壌や水面とは異なる反射特性をもっており、とくに可視域に対して近赤外域での反射が強いことが大きな特徴となっている。

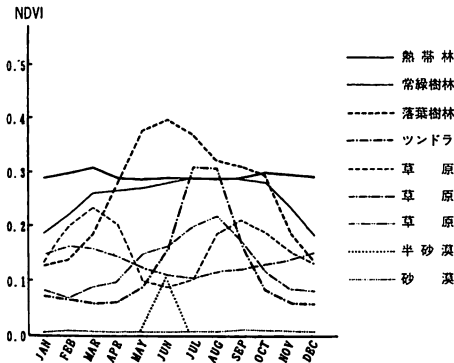
(2) 反射スペクトルの季節変化

生物が季節的に示す諸現象をフェノロジー(生物季節)とよんでいる。リモートセンシングで観測すると、植生は他の非生物的な土地被覆にはない季節変化を示



(Richards, 1986¹³⁾ より一部改変して引用)

図-1 可視~中間赤外域における植生、土壌、水面のスペクトル反射特性



(本多・村井¹⁾より引用)

図-2 植生指数の季節変化

すが、これは植生のフェノロジー、すなわち夏季または湿潤期と冬季または乾燥期のあいだでバイオマスに大きなコントラストを示すためである。

図-2にNDVI (4.1参照)の季節変化を示したが、このように植生型に応じて、常に高い値を示すタイプ(熱帯林)、成長期には高い値を、非成長期には低い値を示すタイプ(落葉樹林、草原等)、一年を通じて低い値を示すタイプ(砂漠等)といった特徴があらわれている。

そこである地域について複数時期の衛星データがあれば、このような季節的な特徴を用いてその植生型を推定することが可能となる。たとえば本多・村井¹⁾はNOAAのGVIデータを用いて世界植生の分類を、また山形ら²⁾はランドサットTMデータを用いて釧路湿原の植生の分類を推定している。

(3) その他の手法

このほか、リモートセンシングから得られる情報としては、マイクロ波領域や熱赤外領域におけるスペクトル情報、蛍光特性、偏光度および空間的なパターン(テクスチャ)などがある。またGISを用いてリモートセンシングで観測されるもの以外の情報(たとえば地形情報や気候情報)をリンクして植生を判別することもおこなわれている。

3.3 グローバルな植生分類のロジック

これまで地上での植生型の調査とリモートセンシングを用いた調査について述べたが、前述の通り、注意しなければならないのは植生型の分類体系が調査手法に応じて異なることである。すなわち前者では種組成に依存した分類であるのに対し、後者では優占種のスペクトル、すなわちどちらかといえば相観に重きを置いた分類となる。

もとより分類の仕方はその目的に応じるべきであるが、グローバルな植生型の分布を知る目的のひとつとして、近年、地球気候モデルや地球生物化学モデルのパラメタライゼーションとしての位置づけが強調されるようになってきた。

そのような分野においては種組成などの生態学的な意味よりも、むしろアルベド、炭素循環などの植生の生物物理的機能の把握に重点が置かれる。これら生物物理的機能の直接的計測手法については、4で述べるが、もうひとつの手法はまず植生型分類をおこない、つぎに各植生型分類を生物物理量に読みかえるというアプローチである。そのためには分類自体を、できるだけ生物物理量と関連づけておく必要がある。このような試みとして、たとえばRunningら³⁾は以下のような分類ロジックを提案している。すなわち1)植生が多年生植物から成るか、あるいは単年生か、2)葉が常緑か、あるいは落葉か、3)葉の型が針葉か、広葉か、あるいはグラス(イネ科草本などの単子葉植物)か、という三つの基準をもとに植生を分類し、各分類に対してLAIや気孔コンダクタンスなどの生物物理量との対応を試みている。

4. 植生の生物物理量の観測

4.1 スペクトル植生指数

3.2で示したように植生は可視域に対して近赤外域で比較的強い反射を示す。このことを利用して、いくつかのスペクトル植生指数(VI:vegetation index)が提案されている。

- RVI (ratio VIまたはSR: simple ratio)

比植生指数とよばれ、近赤外域のバンド値を可視域のバンド値で除した値である。図-3は赤バンドを横軸に、近赤外バンドを縦軸にとったスペクトル散布図であるが、この図の原点と対象点(観測スペクトル)を結ぶ直線の傾きに対応する(図-3b)。

- NDVI (Normalized Differential VI)

正規化(差)植生指数とよばれ、以下の式であらわされる。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

ここで、NIRは近赤外域のバンド値(たとえば、AVHRRバンド2、MSSバンド7、TMバンド4など)、VISは可視域のバンド値(たとえば、AVHRRバンド1、MSSバンド5、TMバンド3など)である(図-3c)。

NDVIは理論的には-1.0~+1.0の範囲の値をとるが、実際にはだいたい-1.0~+0.7の範囲である。雲、水面、雪あるいは氷の地域はマイナスの値となり、裸地土壤では-0.1~+0.1、そして植生量が増すにしたがって大きな値をとる。NDVIはシンプルではあるが、種々の条件の変動に対してロバストだといわれている。

・PVI (Perpendicular Vegetation Index, 垂直植生指数)

Richardson & Wiegand⁴⁾によって背景の土壤の効果をできるだけ抑制する植生指数として提案された。図-3aにおいて、裸地土壤の観測スペクトルはソイルラインとして示した直線上に乗ることが知られており、乾燥土壤はライン上の右上に、湿潤土壤は左下に位置する。一方、バイオマスの大きな植生は散布図上の左上に、バイオマスの小さな植生はソイルラインの近くに位置する。そこで、バイオマスをあらわすように、PVIは観測スペクトルとソイルラインとの距離として計算される(図-3d)。

・その他の植生指数

このほか土壤調整植生指数(SAVI: Soil Adjusted

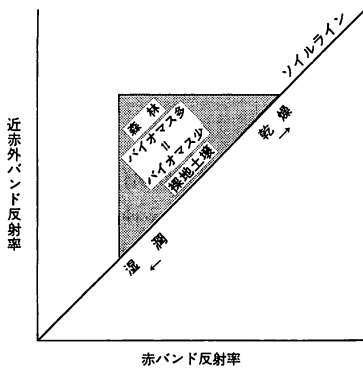


図-3a 模式的な植生の赤・近赤外スペクトル散布図とソイルライン

Vegetation Index)⁵⁾, 変換土壤調整植生指数(TS AVI: Transformed Soil Adjusted Vegetation Index)⁶⁾, 変形土壤調整植生指数(MSAVI: Modified Soil Adjusted Vegetation Index)⁷⁾などの指数が提案されている。

4.2 植生の生物物理量とその意味

スペクトル植生指数は基本的にリモートセンシングにより観測される指標であり、この値から直接、あるいは他の情報と併用しつつ生物物理量が推定される。

下記にあげたような主要な生物物理量は、生態系の機能と構造を明らかにする上でも、また気候モデルや大気圏-生物圏相互作用モデル、あるいは炭素収支モデルなどのパラメタライゼーションの上でも重要である。

(1) バイオマス

バイオマス (biomass) とは、ある空間に存在する生物体の量である。生態系の基礎的な指標であると同時に、炭素循環などの物質収支、エネルギー収支を考える上でも重要である。上述のスペクトル植生指数と緑色植物のバイオマスとの関連性が、とくに初期の研究において示された。

(2) LAI

葉面積指数 (leaf area index) とは植物群落の葉面積を、その群落が占める地表の面積で割った値である。これまで、NDVIとLAIとの関係などが研究されてきており、ある値まではLAIの増大につれて、NDVIがほとんど線形で増大するが、ある閾値以上ではその増加がゆるやかになることがわかっている。グローバルなLAIの推定については、たとえばSellersら⁸⁾は、後述の方法でFAPARを推定し、植生型ごとに異なるFAPARとLAIとの関数関係をあてはめ、FAPARからLAIを求めるという手順を提案している。

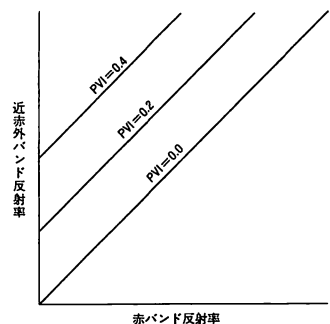
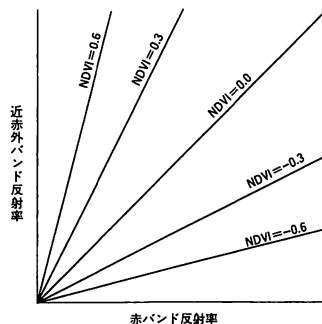
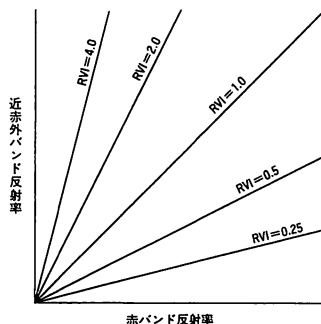


図-3b 比植生指数 (RVIまたはSR)

図-3c 正規化差植生指数 (NDVI)

図-3d 垂直植生指数 (PVI)

(3) APAR

植物は光合成のために400~700 μm の光を利用する。そこでこの波長帯の放射を光合成有効放射量 (PAR : photosynthetically active radiation), 植生による吸収を光合成有効放射吸収量 (APAR : absorbed PAR), その比を光合成有効放射吸収率 (FAPAR = APAR/キャノピー上部での入射PAR) とよぶ。植物群落の光吸収能は光合成量を決定する重要なパラメータであり, またバイオマスやLAIなど他の生物物理量とも密接な関連がある。

これまでAPARとスペクトル植生指数との関係について多くの研究がおこなわれてきており, 最近ではLAIやバイオマスよりもAPARの方がより植生指数との線形関係が強く, さらにAPARはLAIよりも光合成プロセスに対してより直接かかわると評価されている。グローバルなFAPARの推定について, Sellersら⁹⁾は, $1^\circ \times 1^\circ$ グローバルNDVIのデータセットから, RVIを計算し, それとFAPARが植生型に応じた線形関係にあることを仮定してFAPARを導くという手順を提案している。

(4) NPP

純一次生産力 (NPP : net primary productivity) とは, 独立栄養生物による総生産から, 生産をおこなう生物自身の呼吸を差し引いた量 (純一次生産) の単位時間あたりの量で, 一般には光合成生物による生産がその大部分を占める。

グローバルなNPPについては, たとえばFieldら⁹⁾はNPPをAPARと放射利用効率の積として計算し, グローバルな陸域のNPPを推定している。

5. 植生変化の観測

5.1 植生変化の観測手法

Landsat 1号が打ち上げられたのは1972年のことだった。それ以来, 1~3号については18日に1回, 4, 5号については16日に1回の割合で世界各地の観測データが蓄積されている。NOAAは原則として常時2機が運用されており, 同一地点を1機で最低1日2回, 計1日4回以上の観測が行われている。このようなデータを用いれば, 通常の地上調査では不可能な, グローバルな植生変化の抽出や, 山火事・噴火などの突発的な現象の事前, 事後の比較, あるいは今となっては調査不可能な過去の植生変化の抽出などが可能となる。以下, 変化抽出の事例を述べる。

5.2 森林減少の事例

ブラジルのアマゾンには約490万平方kmの熱帯林が残されている。しかし周知のごとく焼き畑や道路建設, ダム建設などによる森林破壊がすすんでいる。Skole & Tucker¹⁰⁾は, ランドサット画像を用いて, 1978年から1988年にかけての森林減少の観測をおこなった。かれらはとくに生物多様性の観点から生息地としての森林の機能に着目し, 減少した森林, 分断化された森林, およびエッジ効果を受けている森林のそれぞれの面積をGIS (地理情報システム) を活用して求めた。その結果, 森林減少面積は, 1978年の78,000平方kmから1988年の230,000平方kmへと増大し, 同じく孤立林面積は5,000平方kmから16,000平方kmへ, エッジ効果を受けている森林面積は125,000平方kmから341,000平方kmへとそれぞれ増大した。

また森林火災による森林の消失も大きな問題である。たとえば堀口ら¹¹⁾は1987年5月6日から6月2日にかけての中国・ロシア国境の森林火災をNOAAの9号と11号の計19シーンをを用いて, 観測している。かれらはこれらのデータを用いて, 森林火災地と森林地の植生指数, 地表面温度などの年変化と季節変化を明らかにしている。その結果, 全火災面積は約70,000平方kmで, 火災による植生指数の回復年数は, 火災発生後軽害地では5年, 中害地では7年, 激害地では10年と計算された。

5.3 砂漠化の事例

「砂漠化防止条約」では, 砂漠化を「乾燥, 半乾燥および乾性半湿潤地域における種々の要素 (気候変動および人間の活動を含む) に起因する土地荒廃」と定義し, さらに土地荒廃とは, 生物学的または経済的な生産性と複雑性の減少であり, 風または水による土壌侵食, 土壌の物理的, 化学的および生物学的または経済的特質の悪化, 長期間にわたる自然植生の消失などのプロセスにより生じるとしている。このうちリモートセンシングによる観測にもっとも適しているのは「長期間の自然植生の消失」であろうが, これは上述したような森林減少の観測に比べて難易度が高い。その理由は, 第一に森林減少が森林から裸地へというスペクトル的に大きな変化を生じる現象であるのに比べて, 砂漠化はもともと草原地帯のようにバイオマスの小さいところで生じるものであり, スペクトル的には小さな変化であること, 第二に乾燥した地域ではバイオマスは降水量に大きく依存するため, 土地荒廃のような一方向的な変化と降水量の年間変動および年次間変動による一時的な, 可逆的な変動とを判別するのが

困難であることがあげられる。

たとえばDregne & Tucker¹²⁾は、サハラ南縁地帯を対象に1981~1986年間の年積算NDVIの閾値により示される年平均砂漠限界を用いて、その年次変動を検討した。その結果、この5年間の最乾燥年であった1984年には最湿潤年の1981年に比べて、砂漠限界はニジェールとエチオピアで40km、スーダンで380km、平均して170km南方に前進していることを示した。

ただしこのようにして観測される砂漠限界の退行現象を砂漠化をあらわすものとして解釈することが可能かどうかについては、地上での調査も含めたより総合的な検討が必要であろう。

6. 植生観測の将来

最後に植生観測の将来について簡単に展望しておきたい。グローバルな植生観測に求められるのは、第一に衛星・センサの開発、第二にモデルとアルゴリズムの開発、第三に地上実験である。

第一の衛星データについては、ここ2、3年の間に高解像度化とハイパースペクトル化が一気にすすむことが予想される。高解像度化については、1998年3月に米国Space Imaging社から打ち上げられる予定の衛星Ekonosは、パンクロで解像度0.8m、観測幅11km、カラーで同じく3.2m、11kmというスペックをもつ。このような商用超高分解能衛星データは従来の空中写真にとってかわるものと期待されている。一方、1997年8月にNASAの打ち上げた衛星LewisにはTRW社によって開発された超多スペクトル画像センサ(Hyper Spectral Imager)が搭載されており、このセンサは384ものスペクトルを計測することが可能であった。残念ながらこの衛星は打ち上げ後1ヶ月で故障し、データはとれなかったが、世界的に同様の計画はすすんでおり、近い将来超多スペクトルデータが利用可能になるだろう。

第二に、リモートセンシングデータを加工して、種々の生物物理量にかかわるデータセットを作成していくためにはそのモデルとアルゴリズムが重要である。とくにグローバルなデータセットを作成する上では、生物分野と工学分野にまたがる学際的な研究体制が求められる。

第三に、いかなる衛星観測データも地上実験による検証を経る必要がある。衛星観測と地上実験との総合的な研究プロジェクトとしては、HAPEXやFIFEなどが知られているが、これからも多様な生態系を対象

として、この種の総合実験の必要性がますます高まっていくだろう。

参考文献

- 1) 本多嘉明, 村井俊治: 世界の植生, 地学雑誌, 101 (6) (1992), 514-527.
- 2) 山形与志樹, 小熊宏之, 富士田裕子: 多時期のランドサットTM画像を用いた湿原植生分類, 写真測量とリモートセンシング, 35 (4) (1996), 9-17.
- 3) Running, S. W. et al.: A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis, Remote Sens. Environ., 51(1995), 39-48.
- 4) Richardson, A. J., Wiegand, C. L.: Distinguishing vegetation from soil background information, Photogramm. Eng. Remote Sens. 43 (12) (1977), 1541-1552.
- 5) Huete, A. R.: A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Remote Sens. Environ., 25(1988), 295-309.
- 6) Baret, F. and Guyot, G.: Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, Remote Sens. Environ., 35(1991), 161-173.
- 7) Qi, J. et al.: A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, Remote Sens. Environ., 48 (1994), 119-126.
- 8) Sellers, P. J. et al.: A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI, Int. J. Remote Sens., 15 (17) (1994), 3519-3545.
- 9) Field, C. B., Randerson, J. T., Malmstrom, C. M.: Global net primary production: combining ecology and remote sensing, Remote Sens. Environ., 51(1995), 74-88.
- 10) Skole, D., Tucker, C.: Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988, Science, 260(1993), 1905-1910.
- 11) 堀口郁夫, 劉大力, 谷宏, 町村尚: NOAA/AVHRRデータによる森林火災地の植生指数と地表面温度による回復状況の解析, 日本リモートセンシング学会誌, 14 (2) (1994), 14-23.
- 12) Dregne, H. E., Tucker, C. J.: Green biomass and rainfall in semi-arid sub-Saharan Africa, J. Arid Environ., 15 (1988), 245-252.
- 13) Richards, J. A.: Remote sensing digital image analysis, Springer-Verlag, Berlin (1986), 281.