6. 広域植生モニタリングの手法 / 衛星リモートセンシング

植山　雅仁

6. 1. リモートセンシングとは？

リモートセンシングとは、読んで字のごとく“遠隔計測”(Remote 遠隔, sensing 計測)のことである。リモートセンシングでは、対象物からの反射あるいは放射を計測することで、対象物の形、大きさ、性質を計測する。

リモートセンシングの特徴（岩男，2005）

1. 一度に広い範囲の計測が可能
2. 人がいけないような場所でも計測可能
3. 同じ場所を繰り返し計測可能
4. 様々な情報を同時に計測可能 (マルチスペクトル)
5. 遠隔計測が可能
6. 定量解析が可能

リモートセンシングから分かること

反射率、色情報、気象条件、植物の葉面積、フェノロジー、表面温度、土壌水分、光合成有効放射、土地利用、光合成量、蒸発散量、火災、CO_2・CH_4 濃度と交換量、雪氷面積
上記の情報の長期的な変化や空間的な分布

近年では、1980 年代から蓄積されたデータを利用して、気候変化・変動に伴う広域的な植物の変化、また、人為的な森林破壊などのモニタリングに利用されている。

リモートセンシングは電磁波の反射・放射などの情報を計測する。そのため、計測された情報から調査対象とする現象を上手く関連付ける手法を開発・検討する必要がある。

6. 2. リモートセンシングの種類

リモートセンシングは利用する電磁波のスペクトル帯域により、可視・反射赤外リモートセンシング、熱赤外リモートセンシング、マイクロ波リモートセンシングの 3 タイプに大別できる。

■可視・反射赤外リモートセンシング
　可視～近赤外域における太陽放射の反射率を計測：色情報、植物活性など

■熱赤外リモートセンシング
　物体から射出される赤外放射を計測：表面温度など

■マイクロ波リモートセンシング
　物体からのマイクロ波を計測、またマイクロ波を送信しその反射率を計測：土壌水分、構造など

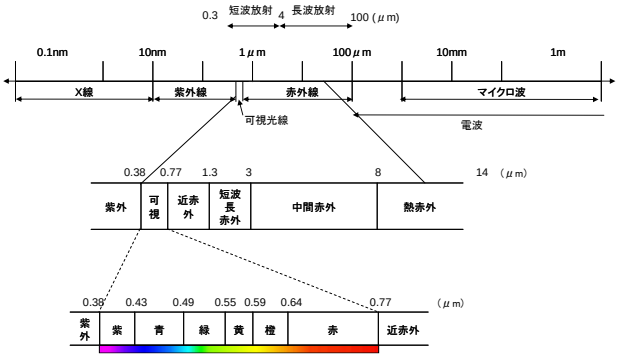

図 1 電磁波の名称と波長
(図解リモートセンシングより作成)

電磁波のスペクトル

リモートセンシングで計測する光や放射といったものはすべて電磁波である。物体から反射・射出される電磁波は、波長によって様々な特性を持つ(図 1)。

リモートセンシングでは、いくつかの波長毎の反射率を同時に計測し、それらを組み合わせて対象物の状態を評価することができる。
（例えば、RGB のセンサーを用いれば色情報を計測できる。）

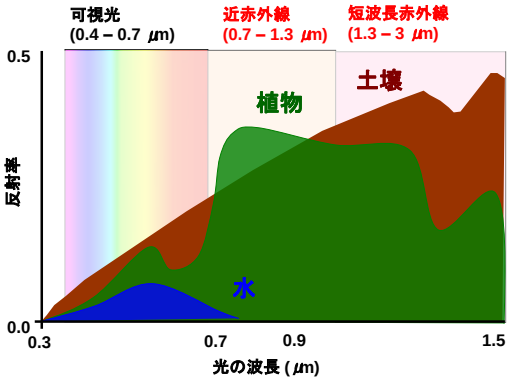

図 2 植物・土壌・水域の分光反射特性

6. 3. 植物の分光反射特性と植生指数

可視・反射赤外リモートセンシングでは、対象物のスペクトル毎の反射率を計測する。このスペクトル毎の反射率のことを、分光反射特性という。例えば、陸地を構成する植物、土、水といった要素は、それぞれに対応した分光反射特性をもつ(図 2)。

植物は、光合成色素の働きで可視域の光を効率的に吸収すると共に、近赤外の光を反射する特徴を持つ(図 2、3)。リモートセンシングを用いた植生モニタリングでは、このような植物の分光反射特徴を利用して NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; 正規化植生指数) という指標が広く用いられている。

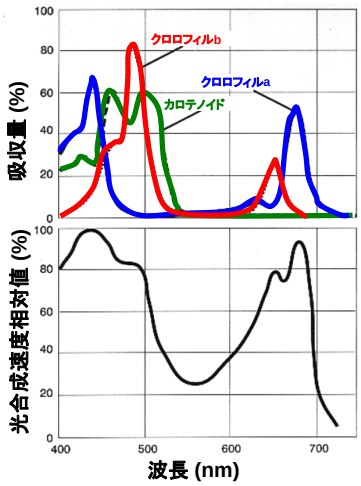

図 3 植物の吸光特性の典型値
(Wikipedia より)

NDVI は、近赤外光(NIR)と赤色光(RED)の反射率を用いて以下のように表される。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \qquad (1)$$

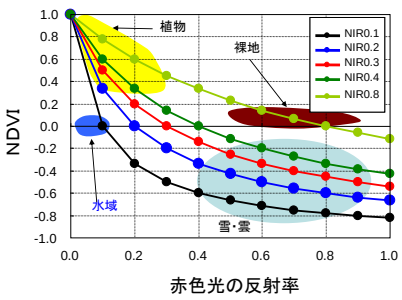

図 4 NDVI と NIR, RED の反射率の関係

NDVI は－1～1 の値をとり、表面が植物によって占められている場合は 0.3 から 0.8 程度の値をとる（図 4）。NDVI は植物の有無や量の指標になるだけでなく、活性度の指標としても用いられることが多い (熱ストレスなどを受けた植物は近赤外域の光を効率的に反射しなくなるので NDVI は低下するとされている) 。

その他の植生指数

SR (Simple Ratio)、EVI (Enhanced Vegetation Index)、PRI (Photochemical Reflectance Index)、NDWI (Normalized Difference Water Index)、GR (Green Ratio)

6. 4. 衛星リモートセンシングによる色の見え方

人工衛星に搭載される分光放射計には特定の電磁スペクトルの波長帯のみに感度のあるいくつかのバンドを有する。これには、可視光である赤色・緑色、青色バンドや、人の目で感知することのできない近赤外バンドや熱赤外バンドといったものも含まれる。例えば、NASA の人工衛星 Terra/Aqua に搭載される中分解能撮像分光放射計（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; MODIS）には、0.4 μm から 14.4 μm の範囲に 36 のバンドを有する(図 5)。これらのバンドの情報は、人工衛星に搭載されるセンサーによって同時に計測される。それぞれのバンドから得られる情報を組み合わせて利用することで、人の視覚のみからでは得ることのできない様々な情報を引き出すことができる（新たな組み合わせを発見することができれば、これまで蓄積されたデータから誰もが引き出せていない情報を発見することもできる！）。例えば、NDVI は、赤色と近赤外バンドを組み合わせることで得られた植物の量や活性に関連する指標である(図 5)。

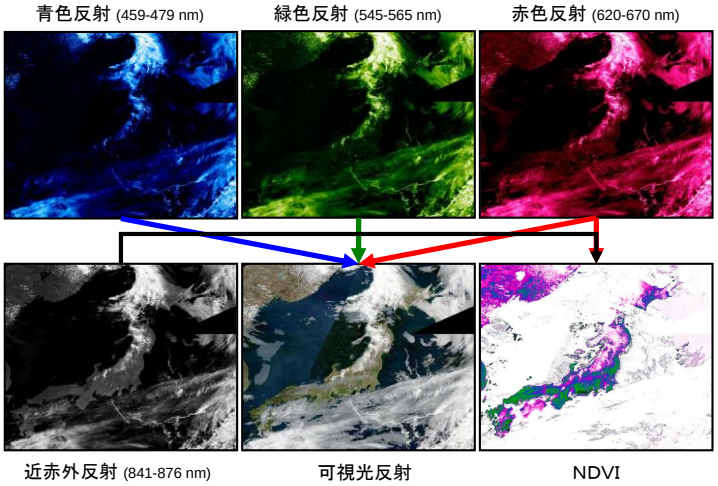

図 5 人工衛星 MODIS からみた 2006/4/28 の日本周辺

6. 5. 雲なし画像の作り方

衛星リモートセンシングでは、一部のセンサーを除いて地表面が雲に覆われている際は、地表面の情報を取得することができない(図 5)。その為、衛星によって観測された情報から、雲の影響を除去する必要がある。例えば、NDVI は、地表面が雲に覆われていれば、雲に覆われていない場合の NDVI と比べて低い値をとる。この事を利用して、植物の量や活性度が一定とみなせるある期間において最大の NDVI 値をその期間の代表値とすれば、雲による影響を最小化することができる。図 6 は、16 日の期間の最大 NDVI を取得することで得られた合成画像（コンポジット画像）である。この最大値を用いて合成する手法は、最大値合成法(Maximum Value Composite; MVC)と呼ばれる。16 日コンポジット画像とすることで、効率的に雲の影響が除去されていることがわかる。ただし、コンポジット化による雲除去は、対象期間の全ての日が雲に覆われている場合は、有効な手段とはならない（例えば、日本の梅雨の時期など）。また、期間の選定は、植物の状態が変化しないと仮定できる程度に、短くとる必要がある。

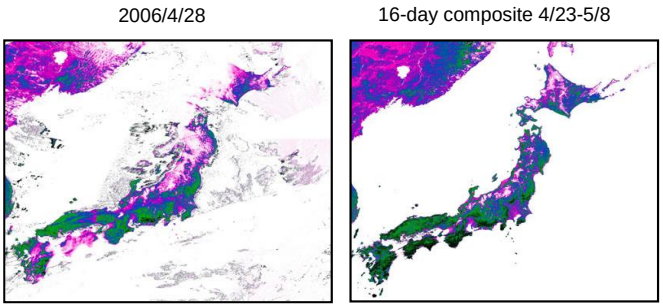

図 6 コンポジット化による雲除去の効果

6. 6. 植生の季節変化

雲の影響を除去することで、広域的な植生の季節による活性状況（フェノロジー）を見ることができる。例えば、図 7 では本州の北半分には落葉樹林が多く分布するために、冬季に落葉により NDVI が低下し、夏季にかけて NDVI が上昇するといった季節変化が観測される。一方で、本州の南から九州、四国にかけては常緑樹林が多く分布するために、NDVI の季節変化は小さい。

このように植生がそれぞれ固有のフェノロジーを持つ事を利用すると、衛星から観測されたフェノロジーを利用して、各ピクセルについてどのような植物が優先しているかを推定することができる（図 8）。このようにリモートセンシングを用いて地表面の利用形態を評価する手法は、土地被服分類と呼ばれる。

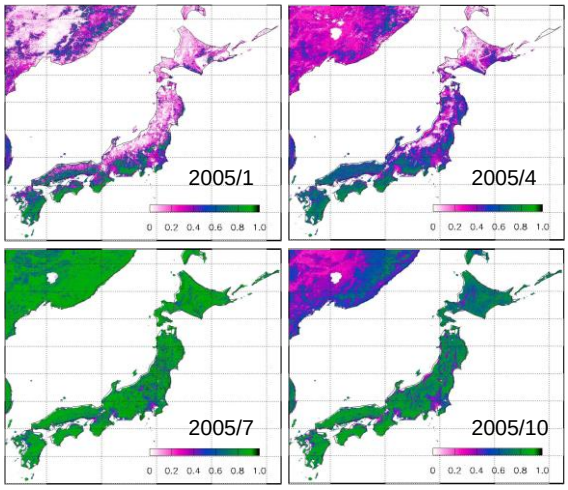

図 7 人工衛星 MODIS から見た日本の植生の季節変化

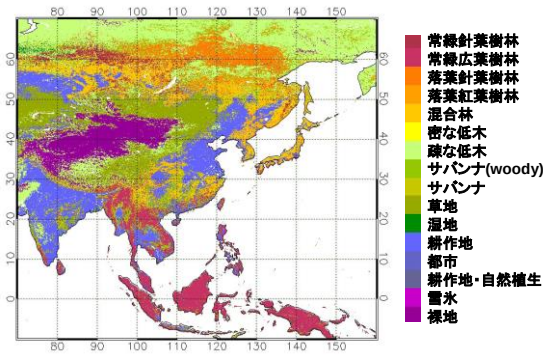

図 8 MODIS による東アジアの植生マップ

6. 7. 植生指数の経年変化

衛星リモートセンシングが植生モニタリングに用いられるようになったのは、米国海洋大気庁(NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration) の人工衛星に搭載される改良型高分解能放射計(AVHRR; Advanced Very High Resolution Radiometer) の運用が始まった 1970 年代後半頃からである。この頃から蓄積された衛星データを使用すれば、30 年以上にもわたる広域的な植生の変化をとらえることができる。

人工衛星データを利用すると広域的な植生の活性度を知ることができる。例えば、図 9 は 2002～2004 年の 7 月における NDVI のアノマリ（偏差）であるが、これによると、梅雨明けが遅れて冷夏となった 2003 年 7 月は本州の全域において NDVI が例年に比べて低い値をとっていたことがわかる。ここで、アノマリ(I_{Anomaly})は、長期平均(I_{average})からの対象年(I_{x})の偏差として以下のように表される。

$$I_{\mathrm{Anomaly}} = I_{\mathrm{x}} - I_{\mathrm{average}} \qquad (2)$$

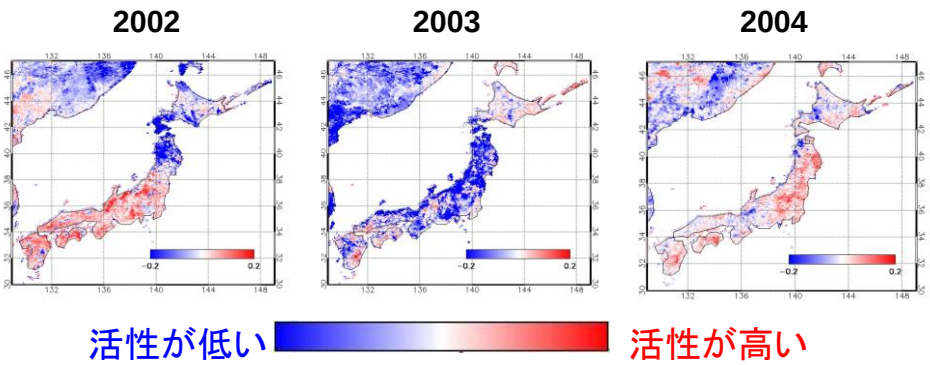

図 9 1982～2006 年の平均値に対する 2002 年～2004 年の 7 月の NDVI のアノマリ

6. 8. 全球スケールの光合成評価の試み

人工衛星から得られる指標と気候などのいくつかの付加的な環境情報を組み合わせることで、光合成速度や蒸発散速度を広域的に評価することが可能となってきている。光合成速度の評価については、多くの手法が提案されているが、ここでは比較的簡易な光利用効率モデルを説明する。

光利用効率（Light Use Efficiency; *LUE*）とは、光合成有効放射吸収量（Absorbed Photosynthetically Active Radiation; *APAR*）あたりの光合成量（*P*）のことで、以下のように表すことができる。

$$LUE = P/APAR \qquad (3)$$

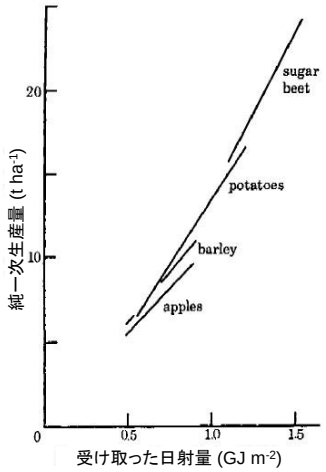

図 10 日射量に対する純一次生産量の関係 (Monteith, 1977)

図 10 は植物が受け取った日射量に対する純一次生産量の関係である。純一次生産量が受け取った日射量に比例して増大していることが分かる。このような関係が成り立つ時、群落スケールでの光合成量は、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P &= LUE * APAR \\ &= LUE * FPAR * PAR \end{aligned} \qquad (4)$$

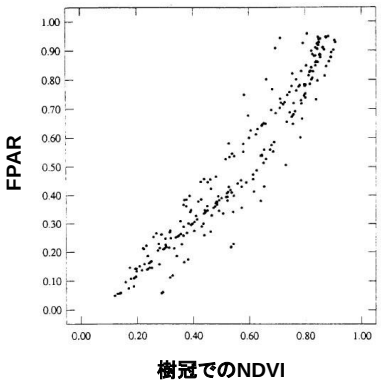

図 11 NDVI と FPAR の関係 (Myneni and Williams, 1994)

ここで、*FPAR* は光合成有効放射吸収率(Fraction of PAR)で、入射した *PAR* に対して植物が吸収する割合を表す(0～1 の値をとる; *FPAR* = *APAR*/*PAR*)。図 11 に示されるように、*FPAR* は NDVI と関連を持つことから、*FPAR* を NDVI から推定することができる。また、*LUE* と環境要因との関係を樹種ごとに求めておけば、*PAR* は衛星リモートセンシングから推定することができるため、4 式の *LUE*、*FPAR*、*PAR* が求まり、光合成を算出することができる。

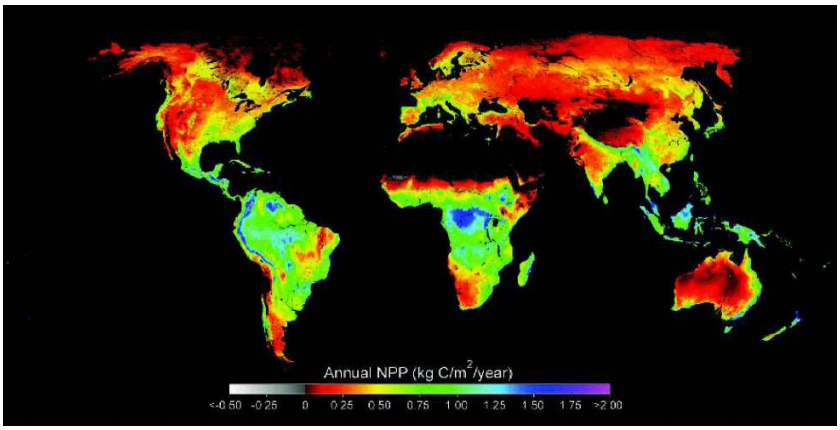

図 12 人工衛星から算出された全球の純一次生産量 (Running et al., 2004)

6. 9. 衛星リモートセンシングの弱点・注意点

■雲があるときは、計測できない。(マクロ波リモートセンシング以外)

雲の下の地表面の状態を知ることはできない。

僅かに雲がかかっている場合でも、雲の影響は深刻である。

日本の梅雨時や、熱帯雨林では雲がかかっている事が多くデータの取得率が落ちる。

■土壌・雪面の影響

衛星から植物をモニタリングする際、植物の隙間から土壌や雪が見えていると誤差になる。

粗な群落のモニタリングを行なう際は、土壌や雪面などの影響を強く受ける。

■大気の影響

空気中の水蒸気やエアロゾルによって影響を受ける。

最新のセンサーでは大気の影響は補正されているが、昔のセンサーだと個別に補正が必要

■得られた結果が妥当であるかを検証することが容易でない。

複数の衛星データや、観測データとの相互比較が必要である。

光合成速度などのフラックスは、モデル推定値であり、直接測定しているわけではない。

引用・参考文献

岩男弘毅, 2005: リモートセンシング読本　―インターネットの情報満載―, 社団法人日本測量学会, 177pp.

Monteith, J. L., 1977: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 281, 277-294.

Myneni, R. B. and Williams, D. L., 1994: On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.* 49, 200-211.

日本リモートセンシング研究会編, 1992: 図解リモートセンシング, 社団法人日本測量学会, 322pp.

Running, S. W., R. R. Namani, F. A. Heinsch, M. Zhao, M. Reeves, and H. Hashimoto, 2004: A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54, 547-560.

参考ホームページ

Wikipedia

Remote sensing : http://en.wikipedia.org/wiki/Remote_sensing

NDVI : http://en.wikipedia.org/wiki/NDVI

MODIS

http://modis-land.gsfc.nasa.gov/

http://modis.gsfc.nasa.gov/