

地球観測衛星データを用いた 全球植生一次生産量推定法の研究

奈良文化女子短期大学 環境教養学科 藤原 昇

宇宙航空研究開発機構（JAXA）からの平成16年度委託研究「ADEOS-II衛星観測データによる全球植生一次生産量の推定」の成果の一部についてその概要を述べる。オゾン層の破壊や二酸化炭素の増加による地球温暖化等の例をあげるまでもなく、地球環境の変動が大きな問題になっている。人工衛星による地球環境の変動観測が1972年より開始され、現在、アメリカ、日本、ヨーロッパ、中国等の地球観測衛星が貴重な測定データを提供している。ここでは2003年に日本で打ち上げたADEOS-II衛星に搭載されたGLIセンサーによる全球モザイクデータを使用した植生の解析を中心に述べる。個々の観測データより雲を除いた全球モザイクデータはJAXAによって作成されたものである。

1 普遍パターン展開法（UPDM）と植生指標（MVIUPD）

パターン展開法^{1,2,3)}は衛星観測多次元データ（波長の関数としての地球の反射率データ）を、固定された三つの基本反射スペクトルパターンを用いて展開することにより、観測情報を基本パターンの展開係数に変換する方法である。スペクトルパターンに分解する意味では、分類のためのSpectral Mixture Analysis(SMA)⁴⁾に似ている。しかしSMAではカテゴリーパターンが分類の目的に応じて変わる事、またカテゴリーパターンは解析の対象となったシーンデータに固有なものとして決定され、解析領域や季節が異なったり、また観測センサーが変わればそれに伴って変わる。本パターン展開法は分類のためのパターン展開ではなく座標変換のためのパターン展開である。従って波長250 nm から2,500 nmの範囲で定義された基本パターンは、 n 次元の波長空間で固定された直交系に近いベクトルである。座標変換の一つである主軸変換は完全直交空間への座標変換であるが、座標軸に物理的な意味（被覆物との関係）はなく、また座標変換の対象となった母集団（シーンデータ）が変わればそれに伴って変わる。パターン展開法は座標軸に物理的な意味を持たせ、かつ不変ベクトルとしている。そのため完全直交ベクトルではなく直交ベクトルに近い斜向ベクトルである。

パターン展開法は過去約10年にわたって開発研究が続けられ改良されてきた^{1,2,3)}。当初のパターン展開法は特定のセンサーに対する基本パターンを、固定された連続基本スペクトルパターンからそのセンサーの観測波長に対応するスペクトルを抜き出していた。従って展開係数はセンサーが同じであれば同じ物理量として直接比較できる量であるが、センサーが異なると直接比較できないのが難点であった。つまりスケールングが必要であった。しかし色々なセンサーで観測されたデータを同時に利用しながら解析するケースが多い今日、センサーに依存しない座標変換が望まれた。そこで従来のパターン展開法をさらに改善し、センサーが異なっても同じ座標空間で、直接解析結果を比較する事を可能にした

手法が普遍パターン展開法である。

1-1 基本スペクトルパターン

すでに述べたように、従来のパターン展開法^{1,2,3)}は固定された反射スペクトルパターンからセンサーに対応する波長のデータを抜き出して基本パターンとしていた。またその規格化がセンサーの観測バンド数に依存していた。そのため、異なったセンサー間での解析結果の直接比較はできなかった。この点を改善したのが普遍パターン展開法^{5,6)}である。波長を λ_i として観測反射スペクトルを $R(\lambda_i)$ とすると基本スペクトルパターンによる展開は以下の式で表される。

$$R(\lambda_i) = Cw * Pw(\lambda_i) + Cv * Pv(\lambda_i) + Cs * Ps(\lambda_i) + C4 * P4(\lambda_i) + r(\lambda_i) \quad (1)$$

$Pw(\lambda_i)$ 、 $Pv(\lambda_i)$ 、 $Ps(\lambda_i)$ は三つの基本スペクトルパターンで、それぞれ水、植生及び土壌の反射スペクトルである。これら三つのスペクトルパターンは多次元の波長空間ではほぼ直行ベクトルに近く、大多数の地上被覆物はこの三つのパターンで展開できる¹⁾。 $P4(\lambda_i)$ は研究目的に応じ特殊な物質のスペクトルの抽出に用いるための補正スペクトルパターンで、通常は三つの基本パターンで十分である。今回は黄色の葉のスペクトルを植生の補正パターンとして採用した。但し元のスペクトルパターンではなく三つの基本パターンで展開した余り(残差)のスペクトルであり、基本パターンに直行するベクトルである。 $r(\lambda_i)$ は展開しきれなかったスペクトルの余り(残差)で、通常 $R(\lambda_i)$ に比べて十分小さな値である。 Cw 、 Cv 、 Cs 、 $C4$ は基本パターンの展開係数である。

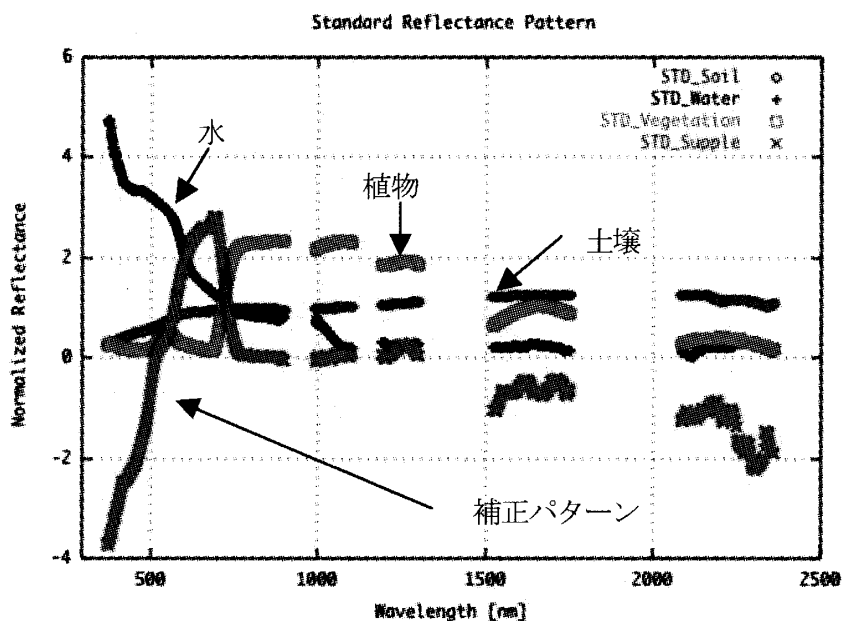


Figure 1 規格化された水、植生、土壌の基本スペクトルパターンと補正スペクトルパターン
(横軸が波長[nm]、縦軸が規格化反射率)

スペクトルパターンの波長領域は衛星センサーの観測波長領域を含む 350 nm から 2,500 nm で、大気

中の水分による吸収領域を除いて全幅 1260 nm である。各スペクトルパターンは

$$\int P_k(\lambda) d\lambda = \int d\lambda = 1260 \text{ [nm]} \quad (k=w,v,s) \quad (2)$$

と規格化し、センサーの観測波長とは無関係である。P4(λ_i)は残差スペクトルで、全波長領域で積分すればゼロとなる。この場合はその絶対値で次のように規格化した。

$$\int |P_4(\lambda)| d\lambda = \int d\lambda = 1260 \text{ [nm]} \quad (3)$$

Figure 1 はこれらの規格化基本パターン及び補正パターンP4(λ)を示す⁵⁾。

地上被覆物の観測反射率R(λ)と展開係数の間には (1)、(2)、(3) の関係式から

$$\int R(\lambda) d\lambda = (C_w + C_v + C_s) \int d\lambda \quad (4)$$

が成り立つ。尚、解析ソフトについては文献7を参照されたい。

1-2 パターン展開とその処理時間

三つの基本パターン及び補正パターンによる地上被覆物の反射率スペクトルの展開は、観測センサーのバンド波長データについて行う。同じ基本パターンを使うので、観測波長数がLANDSAT/ETM (6バンド) 以上であれば、センサーが異なっても同じ地上被覆物に対してはほぼ同じ値の展開係数が得られる⁵⁾。従って解析結果を同じ座標空間で互いに直接比較することが可能となる。今回使用したADEOS-II/GLIのバンド波長は表1に示す9バンドである。λ_cは各バンドの中心波長、Δλはバンド幅である。

パターン展開の処理時間は以下の通りである。使用機種はMac PowerBook G4でプロセッサは1GHz、メモリーは768 MB、OSはMacOS-X10.3.7である。データのバンド数が9、基本パターンの数4、解析データ数(450ピクセル、450ライン)で8秒である。内部ディスクの3,600×3,600の2バイトデータファイルから同データの読み出しにかかる時間が42秒である。パターン展開処理の処理時間はデータ読み出し時間に較べるとはるかに少ない。

表1 解析に使用したGLI観測波長 [nm]

バンド数	λ _i	λ _f	λ _c	Δλ
1	455.0	465.0	460.0	10.0
2	540.0	550.0	545.0	10.0
3	673.0	683.0	678.0	10.0
4	705.0	715.0	710.0	10.0
5	855.0	875.0	865.0	10.0
6	1040.0	1060.0	1050.	20.0
7	1230.0	1250.0	1240.0	20.0
8	1540.0	1740.0	1640.0	220.0
9	2100.0	2320.0	2210.0	220.0

1-3 植生指標 (MVIUP)

NDVIをはじめとして色々な植生指標が開発されている。例えばNDVIは非常に簡便でかつ植生の特色を捕らえているが、二波長の輝度または反射率の情報のみで定義されているため、近赤外波長の輝度が赤の波長の輝度より大きければ植生でないものが植生と誤認される。またセンサーにも依存する。一方パターン展開係数を用いた植生指標の定義は地上被覆物スペクトル全体の特徴を捕らえており、植生と他の被覆物との間での誤認が極めて少ない。パターン展開係数を用いた「新しい植生指標」の定義式は、これまで、色々改良を重ね、最終的には普遍パターン展開法による展開係数を用いた植生指標に到達した。この指標は地上被覆物のスペクトル全体を反映しているだけでなく、観測センサーに依存しない植生指標であることが第二の特徴である。この植生指標をMVIUPD (modified vegetation index based on Universal Pattern Decomposition Method) とし、普遍パターン展開法による展開係数を用いて次のように定義した⁸⁾。

$$MVIUPD = (Cv - Cw - 0.2 * Cs - C4) / (Cw + Cv + Cs) \quad (5)$$

この指標はセンサーに依存するパラメータを含んでいない。従って異なるセンサーに対しても同じ地上被覆物に対してはほぼ同じ値が得られる。また規格化されているので影の影響を受けにくい。植生指標の正の値は植生であることを示すが、NDVIの場合、枯れた植生や土壌に対して有意の正の値を与えるのに対し、本指標はゼロ以下の値を与える⁸⁾。また雲に対しても同様、NDVIは有意の正の値を与えるが本指標は負の値を与える。さらにNDVIは植生比率に対して比例関係になく値が飽和する傾向にある⁸⁾。

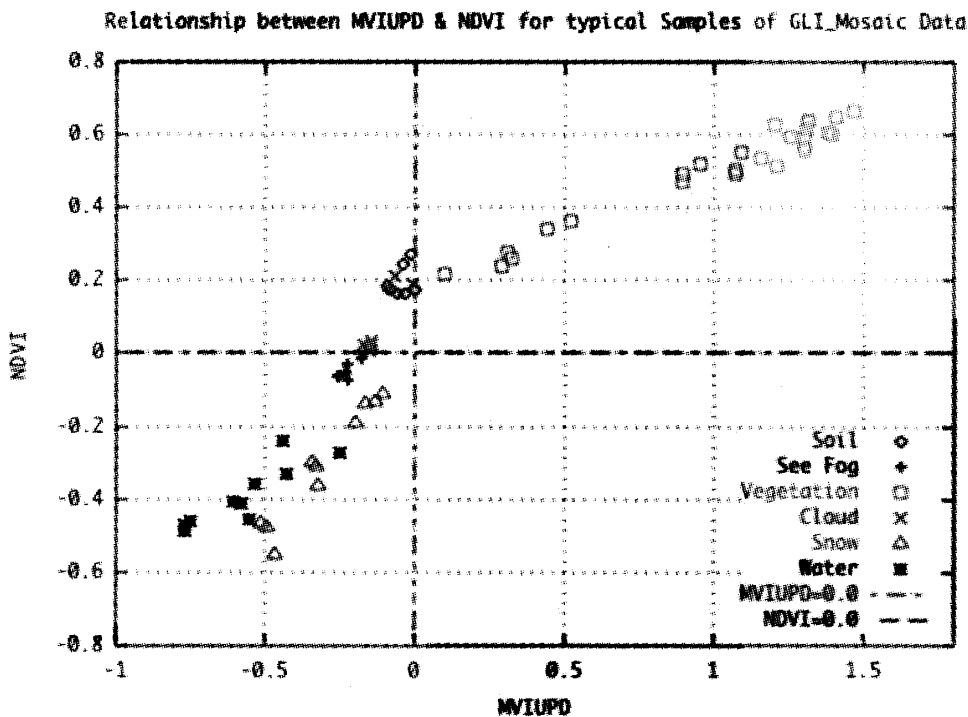


Figure 2 Relationship between MVIUPD and NDVI for Typical Samples of GLI Mosaic Data

Figure 2 はMVIUPDとNDVIとの関係を示す。土壌や雲に対してMVIUPDは負の値であるが、NDVIは

有意な正の値である。またモンゴル平原のように非常に希薄な植生に対してNDVIは0.2 から0.3程度と比較的大きな値を与え、かつ土壌と同程度である。植生一次生産量を見積る場合に大きな問題となる。MVIUPDは植生以外に対しては全てゼロ以下の値となり、少なくとも植生解析には非常に適した指標と言える。またMVIUPDはスペクトル全体の特長を反映しており、多重バンド情報を十分に活かした植生指標と言える。

2 地上測定をベースにした植生一次生産量と植生指標との関係

植生指標と植生による正味の二酸化炭素吸収量（NPP）との関係は、地上で実測したデータを基に決定した。一般にNPPと光合成有効日射量PARとの関係は以下の式で再現できる。

$$F(\text{PAR}) = F_{\text{max}} * b * \text{PAR} / (1.0 + b * \text{PAR}) \quad (6)$$

係数bはパラメータである。Figure 3 にその典型的なNPPとPAR との関係を示す⁹⁾。bは植生の種類等により異なるが、PARを無限大にした極限での値F_{max}は活動している状態での植生固有の値となる。そこで一枚の葉から茶の木等の小型の植物に至る種々の植生についてPARとNPP及び反射率との関係を測定した。そのそれぞれの植生に対して(6)式でフィットしF_{max}を求めた。その結果を表2に示す。表中、EVIはHuete^{10) 11) 12)}の植生指標である。以下MVIUPDとNDVIに着目して述べる。

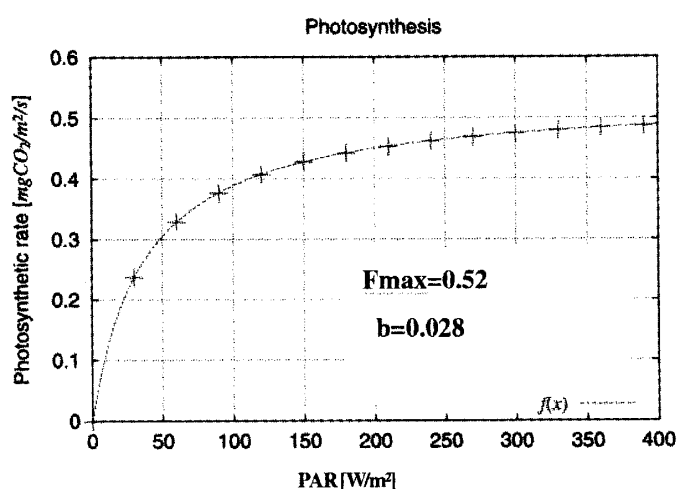


Figure 3 Typical Example for Relationship between NPP and PAR

1枚の葉の場合、二酸化炭素吸収量と反射率の測定は比較的誤差が小さい。茶の木など灌木の場合はビニールボックスで包んで測定するために密閉性に問題が残る事と、灌木としての反射率の測定が難しく誤差も大きい。MVIUPDとF_{max}との関係は次式のように求められる。

$$F_{\text{max}}(\text{MVIUPD}) = 0.63 * \text{MVIUPD} ** 2 + 0.10 * \text{MVIUPD} \quad (7)$$

標準偏差は0.10 [mgCO₂/m²/s]である。得られた2次曲線に対する測定データの標準偏差σは次の式

$$\sigma = [\sum \{F_{\text{max,measured}}(\text{MVIUPD}) - F_{\text{max}}(\text{MVIUPD})\}^2 / (n-1)]^{1/2}$$

で計算した。nはデータの数で(n-1)は自由度である。以下のフィットでも標準偏差については同様の

定義である。相対誤差はおよそ±25%である。

(7)式を使ってNPPの推定値は以下の式で与えられる。(6)式のパラメータbは平均的な値として0.028を用いた (Figure 3 参照)。

$$NPP = F_{max} (MVIUPD) * G (PAR) * (1.0 - Rd) \quad (8)$$

$$G (PAR) = b * PAR / (1.0 + b * PAR) \quad b:0.028$$

$$Rd = (7.83 + 1.15 * (T - 273.0)) / 100.0 \quad (9)$$

$$F_{max} [mgCO_2/m^2/s]$$

$$PAR [W/m^2]$$

(9)式のRdは植生の呼吸量で、気温T (絶対温度) の関数である。NPPは(8)式を時間積分することにより得られる。

表 2 Vegetation Index and CO₂ for Vegetation samples

Sample_No	NDVI	EVI	MVIUPD	Fmax [mgCO ₂ /m ² /s]
sample_532	0.688	0.603	0.437	0.090
sample_534	0.074	0.057	0.075	-0.007
sample_536	0.423	0.360	0.325	0.057
sample_538	0.712	0.750	0.426	0.156
sample_540	0.428	0.366	0.335	0.0361
sample_542	0.096	0.071	0.094	-0.009
sample_544	0.089	0.065	0.139	-0.012
sample_546	0.759	0.592	0.476	0.268
sample_548	0.551	0.584	0.332	0.206
sample_550	0.370	0.301	0.368	0.057
sample_552	0.525	0.450	0.442	0.071
sample_553	0.861	0.715	0.794	0.553
sample_554	0.798	0.482	0.728	0.642
sample_555	0.866	0.692	0.808	0.554
sample_556	0.826	0.614	0.766	0.460
sample_557	0.839	0.601	0.766	0.338
sample_558	0.866	0.663	0.792	0.474
sample_596	0.841	0.749	0.721	0.467
sample_598	0.831	0.700	0.933	0.459

3 ADEOS-II/GLI Mosaic Data によるNPPの推定とその検証

(8)式において、植生指標MVIUPDについてはJAXAより提供された表3のADEOS-II/GLIモザイクデータより求めた。各データは表の日付けから二週間のデータを元に作成された。2003年の1年分の世界気温データは“European Center for Medium-Range Weather Forecasts”より購入した。昼間の各月平均データである。全天日射量は日の出から日の入りまでの時間平均で、その月平均データとしてNOAA-CIRES Climate Diagnostics Centerのデータセット”NCEP-DOE Reanalysis 2”を使用した。

PARは全天日射量の48%とした。NPPを求めるための一日の時間積分は、日の出から日の入りのそれぞれから1時間、合計2時間差し引いた時間について積分した。時間変化する実際のPARを用いたNPPの積分結果は、平均のPARを用い、昼の長さから2時間差し引いた時間について積分した結果とほぼ同じであることが確かめられている。また以下のNPP推定では、気温が10℃以下では正味の二酸化炭素の吸収は無いものとしている¹³⁾。

表3 NPP推定に用いたADEOS-II/GLI Mosaic Data

20030407	20030509	20030525	20030626	20030728	20030829	20030930	20031016
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Figure 4は2003年4月7日付け全球モザイクデータについてのパターン展開係数によるイメージである。Cwに青、Cvに緑、Csに赤を対応させているが本稿ではグレー表示となっている。カラー表示の場合は、緑の部分が植生、北部の薄水色は雪氷であり、パターン展開係数による画像で植生地帯がクリアーに表現されている。

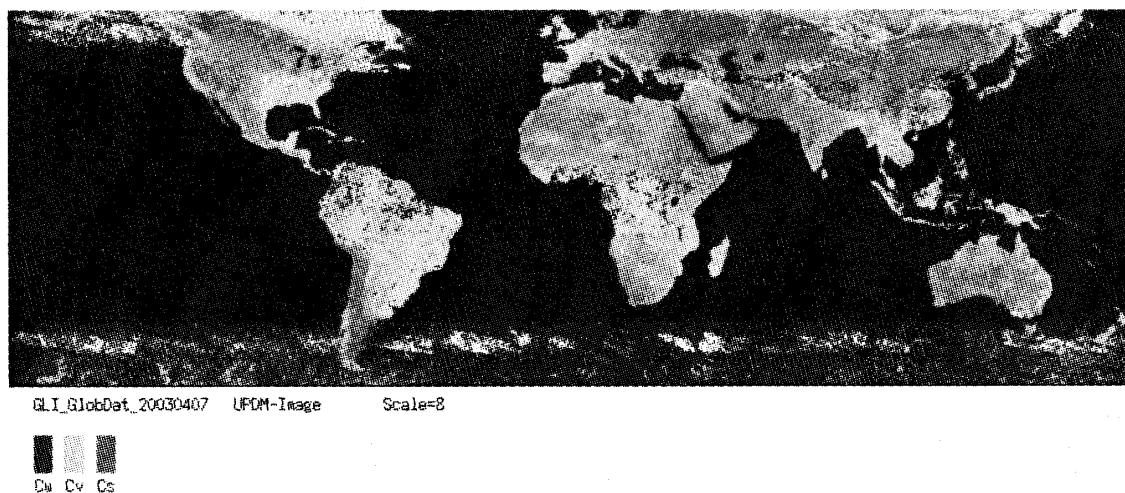


Figure 4 Image of UPDM 3 Pattern Coefficients

一部、雲を除ききれなかった部分（この部分は値がゼロのデータ）、不連続な部分等もあるが全体としてほぼ正常なデータであることを示している。

Figure 5は、本解析に使った気温T（上）、光合成有効日射量PAR（下）データを示す。いずれも例として4月のデータを示す。上段の気温ではヒマラヤ山脈や南半球のアンデス山脈の気温がその周辺に較べて著しく低いのがわかる。同様の理由で日本紀伊半島の山間部の気温は4月でも数度と低いがこのデ

ータでは平野部の気温が使われている。NPP測定ポイントを検証する場合には注意が必要である。下段のPARは、既に述べたように全球で100ポイントの測定点でのデータを元に全球データが作成されているのでかなり荒いデータであることが一見してわかる。

表4は日本¹³⁾、モンゴル¹⁴⁾、ドイツ、米国でのNPP実測値と対応する場所での推定NPPを示す。測定点の緯度、経度を用いて対応する地域のNPPを推定した。NPPの単位は[Pg C/m²/year]である。尚、Pgは10¹⁵gである。モンゴル以外のデータは年間NPPの測定値である。モンゴルについては6月の測定値[Pg C/m² /month]で推定値も同様である。但し図には[Pg C/m²/year]の単位に変換して示している。またドイツ及び米国のデータは約20年前の測定値であるが現在も同じであると仮定している。但しドイツ、米国については、表に示すように、緯度、経度の有効数字が少なく精度に問題があるので、対応地域が植生から外れる場合は隣接する植生地域でNPPを推定した。

推定値と実測値との関係式を表の数値より求めた。結果は次の通りである。

$$(\text{Estimated NPP}) = 0.94 * (\text{Measured NPP}) \quad (10)$$

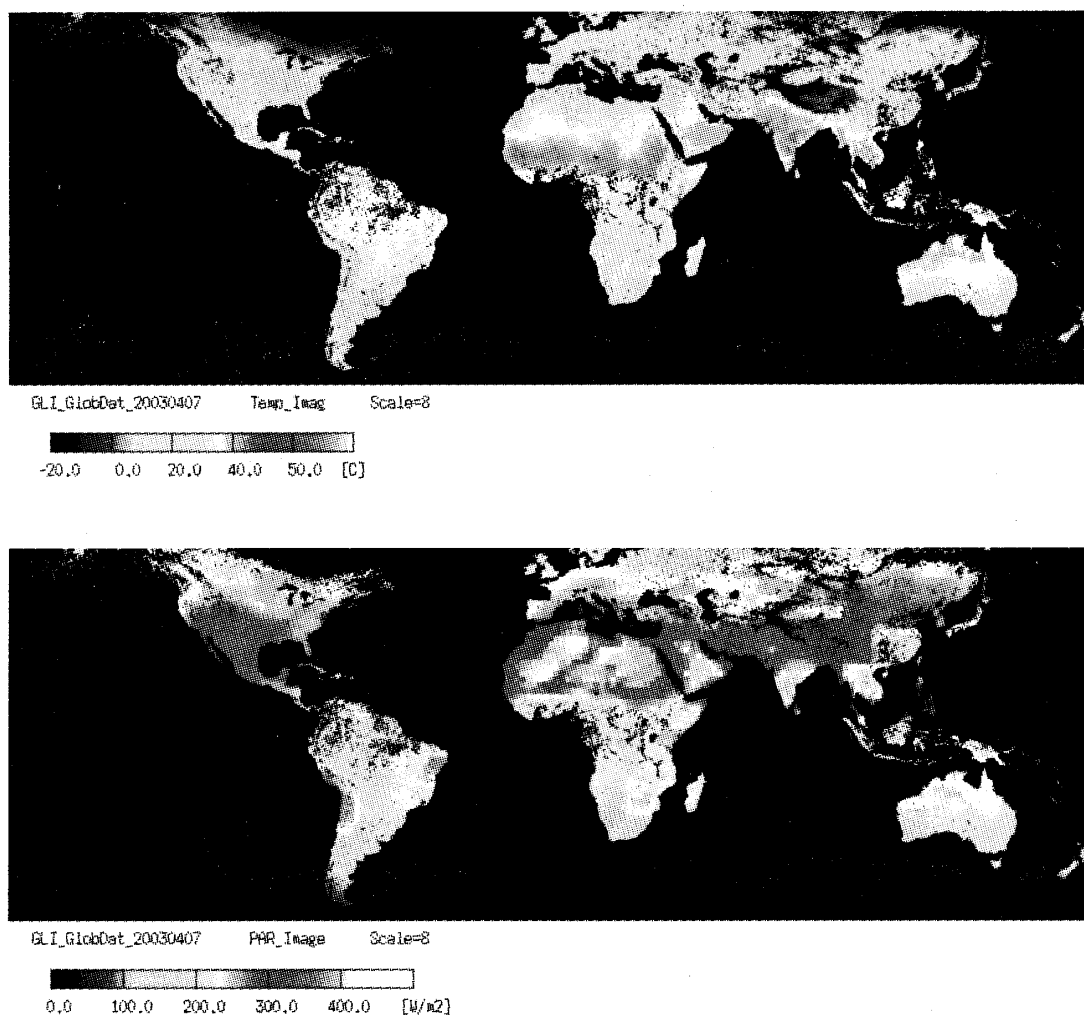


Figure 5 Temperature (up) and PAR (down) distribution in April, 2003

この式に対する推定値の標準偏差は0.14 [Pg C/m²/year]である。標準偏差の実測値に対する相対値は地上測定データ（表2）の標準偏差の実測値に対する相対値と同程度である。ドイツ、米国の実測データは1980、1981年のものであるが、全体として推定値と測定値は標準偏差の範囲内ではほぼ合っているとと言える。

表4 Measured NPP and Estimated NPP [kgC/m²/year]

Measured Point	Year	Latitude	Longitude	MeasuredNPP	EstimatedNPP
Germany, Bad Hersfeld	1981	51.75	9.60	1.163	1.063
Germany, Bad Hersfeld	1981	51.75	9.57	0.958	0.663
Germany, Bad Hersfeld	1981	51.82	9.58	0.771	0.790
Germany, Bad Hersfeld	1981	51.75	9.58	0.807	0.796
Germany, Bad Hersfeld	1981	51.73	9.57	0.719	0.921
Japan, Kii peninsu	2002	34.344	136.027	0.436	0.662
Mongolia, ALM3	2001	46.141	106.553	0.258	0.114
Mongolia, CRG	2001	45.994	106.521	0.121	0.185
Mongolia, C2	2001	45.923	106.523	0.134	0.120
Mongolia, ALM4	2001	45.905	106.457	0.183	0.088
USA, Texas	1980	34.50	-91.55	0.592	0.419
USA, Texas	1980	34.55	-91.42	1.074	1.003
USA, Texas	1980	34.55	-91.55	0.597	0.4

4 全球NPPの推定結果

全球のNPPは表3に示された8時期の全球モザイクデータのそれぞれについて900*300のデータを等間隔で抽出して見積もった。空間分解能は1kmのままである。いわゆるサンプリング法である。全てのデータを用いて見積もった結果と、ほとんど差がないことを確かめている。

年間全球NPPは4月から10月まではそれぞれの時期の実測データによるMVIUPDに基づいて推定した。1、2、3月及び11、12月については残念ながらデータが取得されていないので次の方法で推定した。1、2、3月については4月のMVIUPDを、11、12月については10月のMVIUPDを用い、気温、PAR、Day Lengthについては実際のその月のデータを使用して各月のNPPを求めた。表5は年間の推定NPPの推移を示す。単位は[Pg_C/month]である。変数xを1月1日から12月31日までの日数として、全体を1年周期の余弦関数でフィットした。得られた式は次の通りである。この式に対する推定値

$$\text{NPP}(x:\text{days}) = 4.21 + 2.61 * \cos(2.0 * 3.14 * (x-190) / 356.0) \quad (11)$$

の標準偏差は0.96である。(11)式を1年間に渡って積分することにより次の全球NPPが得られた。

$$\text{全球NPP} = 51 \pm 12 \text{ [Pg_C/year]}$$

上記誤差はフィットした式に対する標準偏差より求めたものである。従来の推定値¹⁵⁾、55 から63 [Pg_C/year] に近い値と言える。

モザイクデータを作成する際に雲を除去しきれなかった部分が残っており、数%低めに見積もっていると考えられる。さらの1、2、3月及び11、12月については4月及び10月のMVIUPDを使っている。この点についてはMODISデータを使うことにより今後改善する予定である。これらの事を含め、また検証値に対する誤差(7)、(10)式の標準偏差を考慮すると、推定値の誤差はおよそ±20%と推定される。

表5 Estimated Global NPP [Pg_C/month]

No.	Day (x)	NPP	No.	Day (x)	NPP
1	14.0	2.60	8	216.0	8.28
2	45.0	2.60	9	249.0	5.11
3	73.0	2.74	10	280.0	4.24
4	105.0	3.15	11	297.0	2.66
5	137.0	4.87	12	319.0	2.46
6	153.0	5.61	13	349.0	2.26
7	184.0	8.06			

5 日本のNPPの推定結果

日本のNPPの推定を試みた。推定方法は全球のNPPの推定法と同様である。Figure 6に2003年8月のNPPイメージを示す。図の下の帯に示された値がグレーの濃さに対応するNPPの値である。大都市を除いて高い植生指標を示し、またこの時期は東北、北海道のNPPが20 [gCO₂/m²/day] 前後の高い値を示す。各地域毎のタイルデータから日本を切り出す関係で、図には沖縄が含まれていない。逆に国後島を日本に含めている。図でNPPの単位は[gCO₂/m²/day]である。秋田県、兵庫県の一部(図で黒い部分)で雲を除き切れていないが、その部分は全体の3%程度である。

Figure 7は2003年のNPPの月変化を示す。横軸は1年を通した日数で1月1日を原点としている。縦軸がNPP [PgC/month]である。図で○印がその時期のモザイクデータを使って推定した値、+印が、3月(75日)については4月の植生指標を使い、PAR及び気温は実際のその月データを使ったものである。11月、12月については10月の植生指標を使い、PAR及び気温は実際のその月データを使ったものである。6月は梅雨の時期であり、日本の約30%について雲が取り除かれていない(全球NPPの推定に対しては、この影響は極めて少ない)。そのため6月については、植生指標を7月のデータを使いPAR及び気温は実際のデータを使って推定した値である。

夏の時期は、0.06 [PgC/month]前後でほぼ一定である。これに対して冬の時期は、ゼロに近いNPPでほぼ一定である。春と秋は急激に変化し四季の変化をよく表わしている。

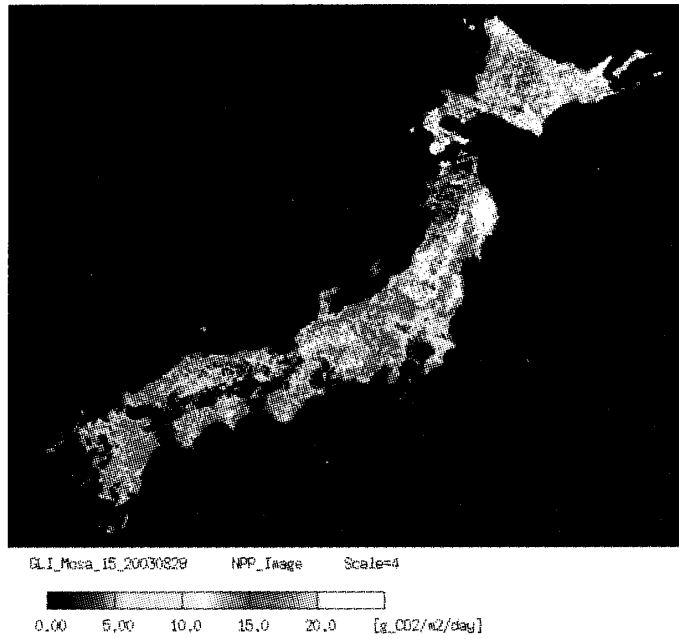


Figure 6 NPP image of Japan of 2003/08/29.

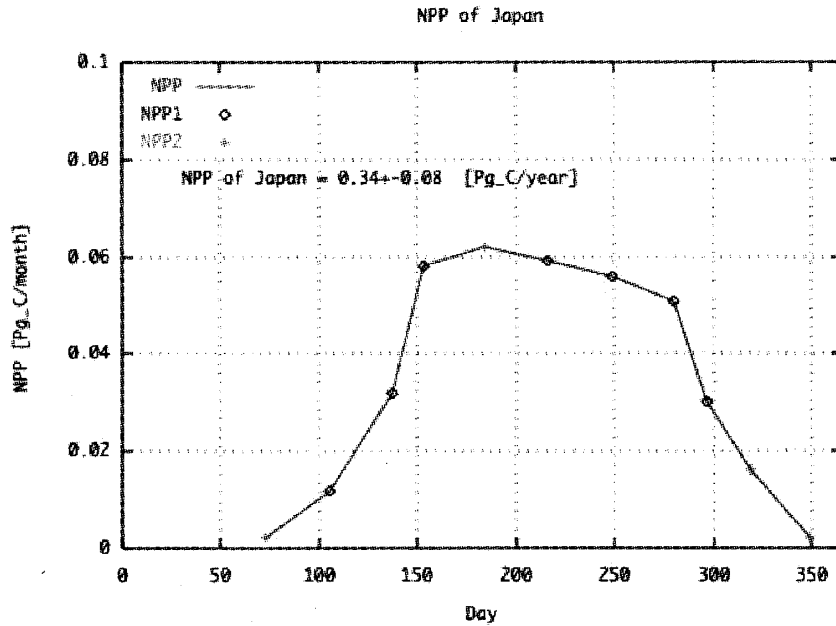


Figure 7 NPP of Japan of 2003

2003年の1年間の積分値は 0.34 ± 0.08 [PgC/year]である。全球NPPの0.67%である。日本の面積は、南極大陸を含めない全球陸の0.28%であり、この比率の較べると大きな比率である。

6 結論

JAXAで作成した2003年4月から10月までのADEOS-II/GLI Mosaic データを用いて全球及び日本の正味の年間植生一時生産量 (NPP) を見積もった。推定方法は普遍パターン展開法に基づいた植生指標 (MVIUPD) を用い、見積もりの公式化はNPP及び反射率の地上測定を基に行った。また衛星データの検証は紀伊半島東吉野 (2002)、モンゴル (2001)、ドイツ (1981)、米国 (1980) のデータを用いて行った。結果は

$$51 \pm 10 \text{ [Pg_C/year]}$$

である。また日本の推定年間NPPは次の通りである。

$$0.34 \pm 0.07 \text{ [Pg_C/year]}$$

誤差は推定値に対する実測値の分散からおおよそ20%と見積もられる。雲を除き切れていない部分が多少残っており多少低めの推定値になっていると考えられる。従来のNDVIを用いたNOAAデータによる見積りよりやや低めの値である。

今後、データを取得できなかった冬の期間についてはMODISデータを用いてADEOS-II/GLI データを補足する予定である。またマレーシア近辺やアマゾン周辺で雲を除ききれなかった部分が多少残っている。これについてもMODIS等たの衛星データと合わせてより完全な推定値とする予定である。NPPの絶対値については推定誤差が大きいですが、同じ手法の推定値の場合、相対的な誤差は大幅に小さくなる。MODISデータを用いた今後のNPPの経年変化を調べる予定である。幸いUPDMに基づいた本解析手法はセンサーに依存しないので、GLI及びMODISを用いたNPP経年変化の継続研究は大きな意味をもっている。

謝 辞

最後になりましたが宇宙開発事業団 (現宇宙航空研究開発機構 (JAXA)) による長い期間の助成に対して深く感謝します。今回の解析ではADEOS-II/GLI モザイクデータを作成して頂いたJAXAのスタッフの方々に厚くお礼申し上げます。また奈良産業大学事務局及び計算機管理室の皆様の支援を得たことに深く感謝します。さらに本研究を進めるに当たり奈良文化女子短期大学の方々のご協力を頂いた事に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) Fujiwara, N., Muramatsu, K., Awa, S., Hazumi, A. and Ochiai, F. (1996)
"Pattern expand method for satellite data analysis"
(in Japanese) Journal of Remote Sensing Society of Japan, 17 (3) , 17-37
- 2) Muramatsu, K., Furumi, S., Fujiwara, N., Hayashi, A., Daigo, M. and Ochiai, F. (2000)
"Pattern decomposition method in the albedo space for Landsat/TM and MSS data analysis"
International Journal of Remote Sensing, 21 (1) , 99 -119.
- 3) Daigo, M., Ono, A., Fujiwara, N., and Urabe, R. (2004) .
"Pattern decomposition method for hyper-multi-spectral data analysis"
International Journal of Remote Sensing, 25 (6) ,1153-1166.
- 4) Adams, J. B., Kapos, R. A., Filho, R. A., Roberts, D. A., Smith, M. O. and Gillespie, A. R., (1995)
"Classification of multispectral images based on fractions of endmembers"
International Journal of Environment, 52, 137-154.
- 5) Zhang, L., F., Furumi, S., Muramatsu, K., Fujiwara, N., Daigo, M., and Zhang, L., (2004)
"Sensor-independent analysis method for hyper-multi spectra based on the pattern decomposition method"
submitted to International Journal of Remote Sensing
Working Paper No.17, Department of Economics, Doshisha University , Kyoto,Japan
- 6) L. Zhang , N. Fujiwara, S. Furumi, K. Muramatsu, M. Daigo, and L.Zhang (2005)
"Assessment of the universal pattern decomposition method using MODIS and ETM+ data"
submitted to International Journal of Remote Sensing
Working Paper No.22, Department of Economics, Doshisha University, Kyoto,Japan
- 7) 藤原 昇、他
「普遍パターン展開法による衛星データ解析のためのソフトウェア」
奈良産業大学情報学部報告書 (2005)
- 8) Zhang, L., F., Furumi, S., Muramatsu, K., Fujiwara, N., Daigo, M., and Zhang, L., (2004)
"A New Vegetation Index Based on the Universal Pattern Decomposition method"
submitted to International Journal of Remote Sensing
Working Paper No.18, Department of Economics, Doshisha University , Kyoto,Japan
- 9) Shinobu Furumi, Yan Xiang and Noboru Fujiwara (2004)
"Establishment of an Algorithm to Estimate Canopy Photosynthesis
by Pattern Decomposition using Multi-Spectral Data"
submitted to J. of Remote Sensing Society of Japan
- 10) Huete, A., Justice, C. and Liu, H., (1994)
"Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS"
Remote Sensing of Environment, 49, 224 -234
- 11) Huete, A., Liu, H., Q., Batchily, K. and Leeuwen, W., J., D. (1997)
"A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS"
Remote Sensing of Environment, 59, 440 -451
- 12) Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., P., Gao, X. and Feneira, L., G. (2002)
"Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices"

Remote Sensing of Environment, 83, 195-213

13) Yan XIONG (2005)

"A Study of Algorithm for Estimation of Global Terrestrial Net Primary Production using Satellite Data"
Doctor Thesis, The Division of Integrated Sciences, Nara Women's University 2005

14) Y. Xiong, K. Muramatsu, M. Hirata, K. Oishi, I. Kaihotsu, T. Takamura, S. Furumi and N. Fujiwara (2004)

"Application method for time integral of photosynthesis for NPP estimation
using remote sensing data: Case study in Mongolia"

Journal of Remote Sensing Society of Japan, vol. 25 No. pp.179 - 190

15) Awaya, Y., Kodani, E., Tanaka, K., Liu, J., Zhuang, DE. and Meng, Y. (2004)

"Estimation of the global net primary productivity using NOAA images and meteorological data
: changes 1988 and 1993"

International Journal of Remote Sensing, 25, (9) , 1597-1613