

衛星データを利用した全球一次生産の推定： 陸域生態系の純一次生産量の分布

栗屋 善雄¹・小谷 英司¹・庄 大方²

(¹独立行政法人 森林総合研究所・²中国科学院 地理科学及資源研究所)

摘 要

植物が吸収する可視光線の量と純一次生産量(NPP)が比例することが知られている。この関係に基づいて、ノア衛星のAVHRRデータを利用してシンプルなNPP推定モデルを構築し、1998年の全球陸域のNPPを推定した。陸域植生のNPPは年間56.8ペタグラムと推定され、熱帯雨林とその周辺で高く、高緯度や乾燥地で低くなる傾向が現れた。1月では南半球でNPPが高かったが、4月、7月と植物の生育エリアが北上する様子が解析結果から明らかになった。緯度毎に月別のNPPを集計すると、全ての月と地域の中で、7月の北緯50~60度で単位面積あたりの生産量が最大となり、月間のNPP総量と比較すると他の緯度帯の2倍以上となった。一方、亜熱帯高圧帯で四季を通じてNPPが低く、赤道付近では年間を通じて生産速度があまり変わらないことが示された。植生タイプ別にNPPの平均値を求めたところ、既存の生態学研究の文献値と比較すると森林で同程度、農地で約2倍だった。

キーワード：季節変化、純一次生産量、陸域植生、AVHRR、NDVI

1. はじめに

近年、全球の平均気温が上昇し続けていて、地球規模の温暖化が現実味を帯びてきた。二酸化炭素は地表面から赤外線形で放出される熱を捕捉して大気を暖める気体(温室効果ガス)である。二酸化炭素は産業革命以後に濃度が急増し、地球温暖化に大きく影響していると指摘されている¹⁾。ところで、地上の植物や海洋の植物プランクトンは、光合成によって二酸化炭素を吸収して炭素を固定し、酸素を放出する。このため、地球温暖化の問題を明らかにするには、陸域および海洋と大気間の二酸化炭素の収支を正確に把握することが重要である。

植物が二酸化炭素を呼吸して作り出す固形物の量を純一次生産量(Net Primary Production : NPP、あるいは純一次生産力)と呼び、1年間の固定量を集計してNPPとすることが多い。NPPは植物の総光合成量(総一次生産量、Gross Primary Production : GPP)と呼吸量(Respiration : R)の差で、次式で示される²⁾。

$$NPP = GPP - R \quad (1)$$

実際には、地中の土壌微生物が放出する二酸化炭素(土壌呼吸)をあわせて集計しないと、陸域生

態系と大気間の二酸化炭素の収支を求めることはできない。しかしながら、人工衛星に搭載されたセンサが観測するデータでは土壌呼吸量を推定できないため、衛星データで推定可能なNPPについて研究を行った。

2. 衛星データによるNPP推定の背景

地表面で反射された太陽光の強さを観測する機器を可視赤外放射計(あるいは光学センサ)と呼ぶ。1959年のExplore 6号(米国)の打ち上げによって、人工衛星に搭載された機器で地球を観測したデータが地上に送信されるようになった。1970年には気象衛星NOAAが打ち上げられて、全球を随時観測するようになった。1978年に打ち上げられたTIROS-N(NOAA)以降はAVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)センサが搭載され、以来現在まで同じ仕様のセンサで継続してデータが取得されている³⁾。1981年半ば以降のAVHRRで観測された数値データが保管されており、地球表面の時系列的な変化を解析することが可能である。AVHRRは可視光線の赤、近赤外線と熱赤外線を観測している(表1)。可視・近赤外の観測波長帯が海洋観測には向いていないため、これらの波長帯のデータは主に陸域の解析に利用される。逆に熱赤外の波長帯は、熱放射の特性が

表1 AVHRRの諸元.

搭載衛星	NOAA		
初搭載	1978年		
飛行高度	808~826 km		
観測幅	2,700 km		
地上分解能	1.1 km (衛星直下)		
観測頻度	1回/1日		
観測波長域(um)			
チャンネル1 赤	0.58 - 0.68		
チャンネル2 近赤外	0.725 - 1.10		
チャンネル3 熱赤外	3.55 - 3.93		
チャンネル4 熱赤外	10.30 - 11.30		
チャンネル5 熱赤外	11.50 - 12.50		
データ名	LAC (オリジナル)	GAC	PathFinder
メッシュサイズ	1.1 km	約5×3 km	約8 km

物体毎に異なるために陸域での利用は難しいが、海洋では表面水温の推定に利用されてきた。

植物は光合成によって可視域の太陽エネルギーを利用して大気中の二酸化炭素から炭素を炭水化物として固定し、酸素を放出する。この時の可視光線の吸収量に対して増加する植物体量(乾重換算の成長量)の比を光利用効率(Light Use Efficiency : LUE)と呼ぶ。似たような指標として量子収率がある。量子収率は、光合成のために吸収した光量子のモル数に対する固定された二酸化炭素分子のモル数(あるいは放出される酸素分子のモル数)の比を言う。Monteith⁴⁾は次式に示されるように、NPPは植物が吸収する可視光線の量に比例することを報告している。

$$NPP = \varepsilon \cdot fAPAR \cdot PAR \quad (2)$$

ここで、 ε は光利用効率、PARは光合成有効放射(Photosynthetically Active Radiation)、fAPARは植物が吸収する可視光(光合成有効放射)の割合(fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation)である。植物の成長は光だけではなく気温や水分に影響されるので、その影響を(2)式に組み込む必要がある^{5),6)}。また、植物の種類や生育段階に応じて光利用効率が変わることが知られている⁷⁾。

リモートセンシングのデータから求められる正規化植生指数(NDVI)とfAPARは比例関係にあり、この関係を利用してNPPを推定する方法は、衛星データを用いてNPPを推定する有効な方法のひとつである。NDVIとfAPARの関係は以下の式で表される⁸⁾。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (3)$$

$$fAPAR = a \cdot NDVI + c \quad (4)$$

ここでRは赤チャンネルでの反射係数(明るさ)、NIRは近赤外チャンネルでの反射係数、aとcは定数である。(4)式のcは文献^{5),6),8)}ごとに値にやや差があるが、0に近いため本研究では無視した。

3. 衛星データによるNPP推定

本研究では(2)式と(4)式に基づいて、NPPを推定するアルゴリズムを開発して、全球NPPのマッピングに利用した⁹⁾。本節ではモデルの概要を紹介する。(2)式と(4)式を組み合わせると、NPPは次のように表せる。

$$NPP = \varepsilon' \cdot NDVI \cdot 0.5 \cdot SR \quad (5)$$

ここで、0.5は日射(SR)に占める可視光の平均的な割合、 ε' は日射とNDVIに基づいた場合の光利用効率を示す。

様々な植物について光利用効率を測定することは困難である。また、地表物体の色は見る角度によって変わるので、衛星センサと同じ条件で地上観測を実施しないと、NDVIとfAPARの関係を正確に決定することは困難である。しかし、様々な植生について観測を実施することも決して容易ではなく、とくに個体サイズの大きな樹木では困難である。このため、精度は下がるが、何らかの代替手段で光利用効率の代表的な値やNDVIとfAPARの関係を推定することが現実的である。

本研究では、AVHRRデータを約8 kmのメッシュに編集したPathfinder(PAL)データ¹⁰⁾を利用した。PALデータにはGAC(Global Area Coverage)と呼ばれる約5 km×3 kmメッシュのAVHRRデー

タが利用されている。GACはオリジナルの地上分解能約1 kmメッシュの画素を間引いて作られる。オリジナルデータの5カラム×3ラインのうち最初の4画素だけを平均してGACの1画素としている¹¹⁾。このため、5 km×3 kmのエリア内の多くが森林であっても、実際に平均化される4画素が農地であれば、GACの画素は農地を示すことになる。PALデータは4画素のGACデータをさらに平均化している。本研究で利用した月モザイクデータは、各月毎にNDVIが最大値を示す画素をモザイクして、雲の影響を軽減している。

PALデータはこのような過程を経て作られているため、1年を考えた場合、時間的・空間的に様々な土地被覆や植生が1画素(地点)に混在した情報であると考えることが妥当である。従って、地上データとPALデータを直接比較することや、地上観測に基づいて得られた結果を直接PALデータに適用することは、あまり適切ではない。

ここでは筑後モデル¹²⁾を用いて光利用効率を求めた。筑後モデルは、気温、降水量や日射量をパラメータとして気候学的なNPPのポテンシャルを推定する。そこで、気象官署などで観測された気温と降水量¹³⁾、および日射量¹⁴⁾を筑後モデルに入力してNPPのポテンシャル値を推定し、基準データとした。気象官署での月平均気温10℃以上の期間について、NDVIの局所最大値と日射量の積和を求めて、基準データとの関係を回帰式によって解析することで、全地球植生の平均的な光利用効率(ϵ')を求めた。 ϵ' は0.988と推定された。さらに、(5)式に気温と土壤水分の影響を考慮した次のモデルを作成した。

$$NPP = \epsilon' \cdot NDVI \cdot 0.5 \cdot SR \cdot f(T) \cdot f(W) \quad (6)$$

$f(T)$ は気温、 $f(W)$ は土壤水分によって生じる光合成へのストレスを表す。気温によるストレス関数は関数の形をSemikhatova *et al.*¹⁵⁾に準じて定め、最適光合成気温をNCEP/NCARの気温データ¹⁶⁾を解析して設定した。土壤水分のストレス関数はLarcher²⁾に基づいて定めた。光利用効率は植生タイプや季節によって異なるが⁷⁾、上に述べたPALデータの問題から、植生タイプ毎に光利用効率を設定することが難しいため、全球植生に対して同じ値を用いた。

NDVIは植生の背景となる土壤の色の違いに影響される。葉冠が疎で背景の土壤が上から観察できるような植生では、葉量が同じでも土壤の色が違えばNDVIの値に差が生じる。裸地の場合は、NDVIの値は土壤の色によって決まる¹⁷⁾。

従って、土壤の色の影響を補正しないと、疎な植生ではNDVIからfAPARを正確に推定できない。AVHRRの第1チャンネル(赤、ch1)とNDVIの散布図を描いてみると、例えばサハラ砂漠と他の砂漠では画素の分布が一致せず、土壤の色がNDVI値に影響していることを確認できた。そこで、ch1とNDVIの全球での平均的な関係式を求め、NDVIの値が小さい地域について、この関係式を用いてNDVIの値を補正してからNPPを推定した⁹⁾。この補正は便宜的なもので、NDVI算出に用いたch1を補正に使うことは好ましくないが、乾燥地や半乾燥地でNPPが過大推定や過少推定になるエラーを軽減できた。

このモデルで推定したNPPをプロット調査データから求めた中国の森林のNPPと比較すると、両者は直線関係にあつて相関係数は約0.7で、モデルによる推定値は25%ほど過少推定だった。NDVIは植生のバイオマスとともに増加し、バイオマスが大きくなるとサチュレーションすることが知られている。しかし、NDVIはfAPARとは比例関係にあることから、NDVIが全球植生の生育実態を表す有力な情報であると考えて差し支えないだろう。全球植生のNPPを推定するためのパラメータとしては、NDVIは非常に有効と考えられる。

4. NPP推定結果の特徴

(6)式を用いてNPPをマッピングするためにはNDVIデータだけでなく、日射量、気温と土壤水分のデータが必要で(図1)、NCEP/NCARのReanalysisデータ¹⁶⁾を8 kmメッシュに内挿して利用した。全球の陸域植生についてマッピングした1998年の1年間のNPPの日平均値を図2に、1月、4月、7月と11月のNPPの日平均値を図3に示す。

(6)式はトップダウンのアプローチによって作られた、シンプルな構造をもったNPP推定モデルである。衛星データからfAPARを推定することは比較的容易であり、(6)式はfAPAR推定に基づいている。NPPの推定精度を向上するには、植生の光合成の諸過程を組み込んだモデルを構築すべきである。しかし、既存のプロセスモデルはLAIを基礎とするのに対して、衛星データではLAIを精度良く推定することは困難であるため、既存のプロセスモデルを適用するメリットは少ない。また、PALデータがもつ、時間的・空間的な混合画素の性質をプロセスモデルで考慮することは難しいだろう。現時点では、1981年からのAVHRR

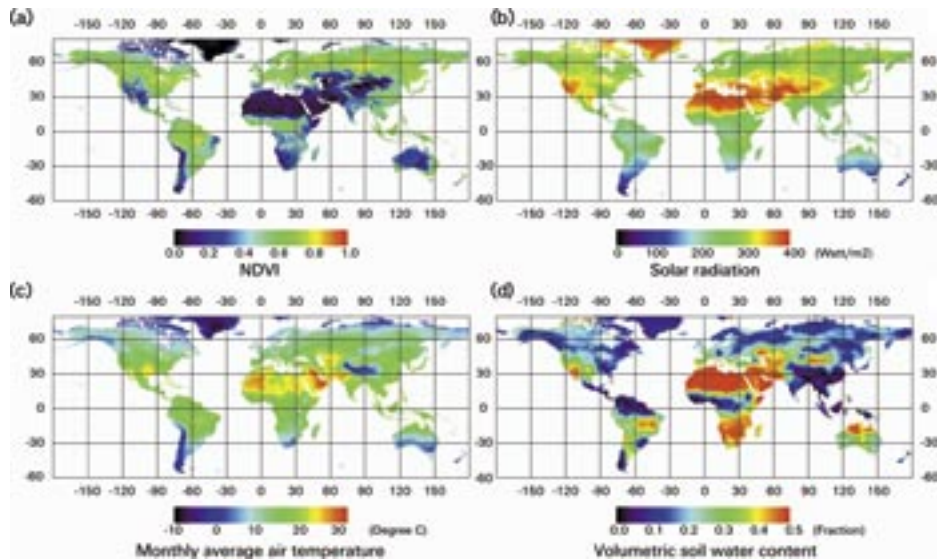


図1 マッピングに用いたデータ(1998年7月の例).
 (a)正規化植生指数, (b)全天日射量($W\ m^{-2}$), (c)月平均気温($^{\circ}C$), (d)月平均の土壌水分量(体積含水率)を示す.

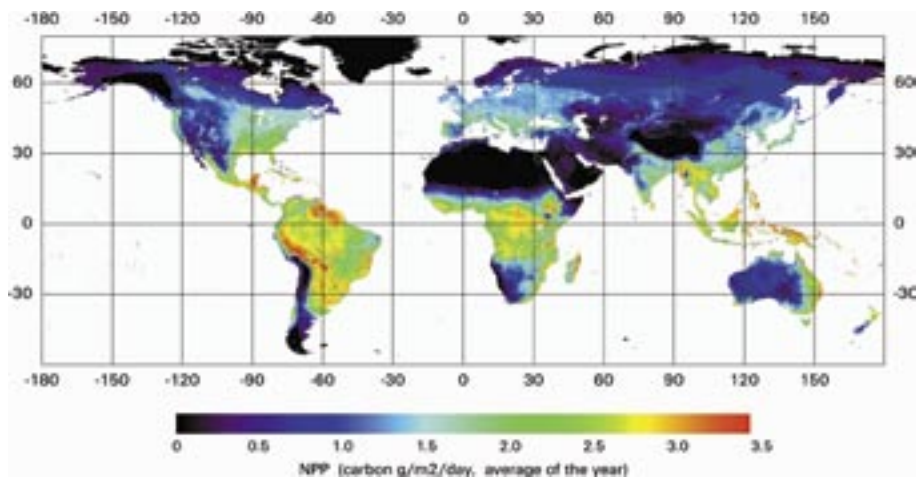


図2 1998年の年間NPPの分布図.
 年間のNPPを1日あたりの平均値(生産速度, 炭素 $g\ m^{-2}\ day^{-1}$)として表した.

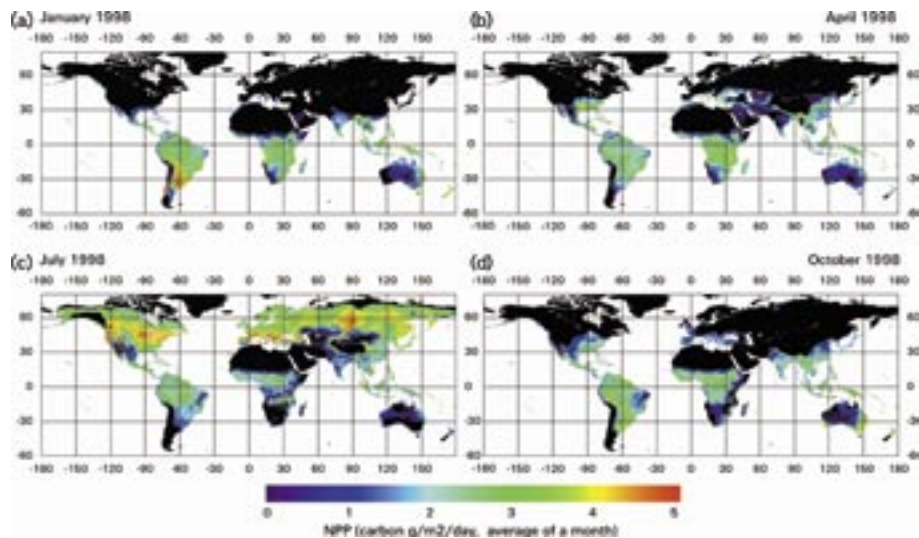


図3 1998年の月間NPPの分布図.
 (a)1月, (b)4月, (c)7月, (d)10月のNPPの分布を示す. 月間のNPPを1日あたりの平均値(生産速度、炭素 $g\ m^{-2}\ day^{-1}$)として表した.

データの資産を生かすためには、シンプルモデルは有力な手段と考えられる。

(6)式は乾燥重量に対してパラメータ化した式であるが、植物の炭素重量は乾燥重量の約45~50%を占める。本研究では炭素の割合を45%としてNPPを炭素量で推定したところ、1998年のNPPは56.8ペタグラム (Pg, 10^{15} g) だった。これはIPCCの三次報告書1)で引用されている59.9 Pg、ないし62.6 Pgよりやや小さい。

4.1 NPPの分布の特徴

年間の分布(図2)を見ると、年間の最大のNPPは赤道周辺に現れている。陸上の生態系の中で熱帯雨林のNPPは最大と言われるが、図2ではブラジルの北部やボルネオ島の北部、あるいはニューギニア島でNPPが高く、 $3.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 程度だったが、アマゾン西部などでは低く $2.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 程度に過ぎなかった。この差はこれら地域でのNDVIの大きさの違いに強く影響されているが、NDVIが林相とどのような関係にあるのか興味深い。NDVIはアンデス東部のペルーやボリビア、およびユカタン半島、さらにはミャンマーやオーストラリア東海岸などの亜熱帯の一部で高い。

乾燥地に注目すると、サハラ砂漠や中近東、ゴビ砂漠などではNPPは極めて小さくなったが、矮性の植物が生えるオーストラリア西部の砂漠地帯では、NPPはやや大きかった。また、植物にとって気温が低すぎるアンデス山脈やロッキー山脈の高山地帯でもNPPは小さかった。これらの地域を除くと、NPPは概ね、低緯度地域から高緯度地域に向かって小さくなる様子が伺える。

図3にはNPPの季節変化を示した。1月には植物の成長は南半球が中心であるが、4月には北上して日本付近でも植物の生育が始まる様子が現れた。7月には北米やユーラシアの広い範囲で植物が成長していることが分かるとともに、夏の中高緯度で1日あたりのNPPが1年を通じて最大となる点が興味深い。10月にはNPPは4月と同じような分布図になった。

4.2 緯度帯別の分布

緯度帯別に単位面積あたり1日あたりのNPPを集計すると、NPPは赤道付近で最大であるが、北半球の中高緯度にもピークを生じた(図4(a))。季節毎に集約すると、北緯50~60度付近の7月の1日あたりのNPPは、他の地域および季節と比較して最大だった。これは高緯度の植生が短い夏に一気に成長を遂げる様子を表していると考えられる。赤道付近では一年を通じてNPPは高く、植物が通年で成長している様子が現れて対照的である。ところで、大気は赤道付近で上昇して対流圏の上部で南北両方向に流れ出し、緯度30度付近で下降して高気圧帯を形成する(亜熱帯高圧帯)¹⁸⁾。図4(a)では亜熱帯高圧帯に相当すると考えられる北緯20~30度付近で四季を通じてNPPが低く、乾燥気候がNPPの地理的分布に影響していることが分かる。逆に気温が高くて湿潤な季節にNPPが高い様子が図4(a)に現れたと言えよう。

緯度帯別にNPPの全量を集計してみると、北半球高緯度植生が植物生産に大きく貢献していることがよく分かる(図4(b))。年間の値を確認すると、北緯10度から南緯20度の緯度帯に次いで、

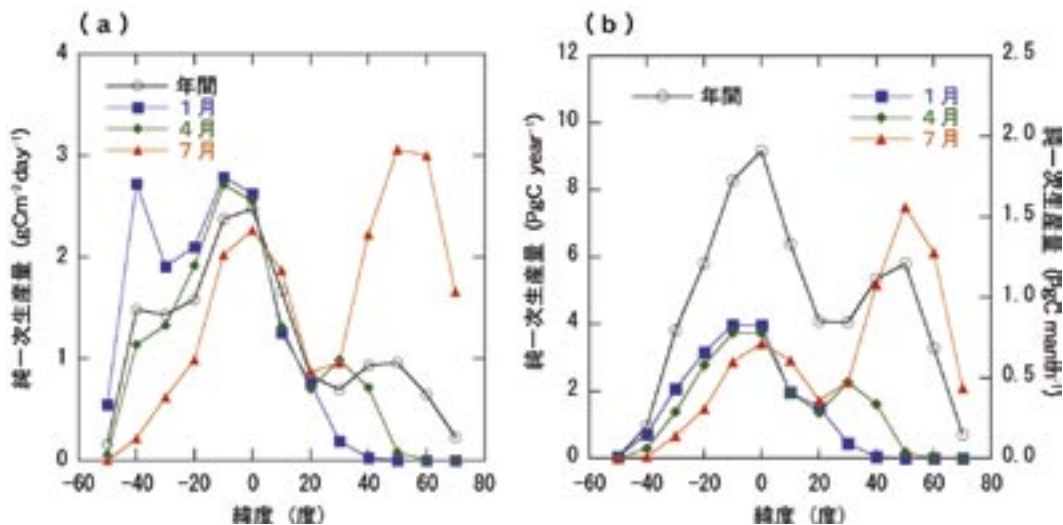


図4 緯度帯別のNPPの季節変化。

a) 単位面積あたり1日あたりのNPP(生産速度, 炭素 $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)を示す。7月の北半球が年間平均から大きくかけ離れていることが分かる。b) 緯度帯ごとにNPPの総量(炭素 $\text{Pg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)を年間と月別に集計した結果を示す。年間のNPPは赤道付近で大きい、季節ごとの変化を見ると7月の北緯60度付近で最大になっている。緯度軸(X軸)のプラスは北緯、マイナスは南緯を示す。

北緯50～60度付近のNPPが大きい。7月の北緯40～60度のNPPは他の地域・季節に比べて突出して、広大なユーラシアと北米のこの季節に高い生産力を有する植生が、全球のNPPに寄与している様子を良く表している。7月の北緯60度のNPPが赤道の倍に及ぶことは注目に値するだろう。

4.3 植生タイプ別のNPP

植生タイプ別のNPPの違いを検討するため、1 kmメッシュのAVHRRデータから作成された植生図のうち、IGBP-DISのデータベース¹⁹⁾中のIGBPカテゴリーに基づく植生図を利用して、植生タイプ別にNPPを集計した(表2)。その結果を見ると、熱帯雨林に該当する常緑広葉樹林が11.94 Pgと大きくて、サバンナ(木本・草本の合計)がこれに匹敵する。「常緑針葉樹」から「閉鎖した灌木」までを森林と考えると、森林は陸域面積の22%、陸域NPPの36%を占めることになる。既存の報告に比べて表2では森林面積が狭く、結果として森林部分のNPPもかなり小さくなったと考えられる。これに対して、農地のNPPがLarcher²⁾のほぼ倍の値で、従来報告よりかなり大きい。植生タイプ分けが比較的似ている項目についてNPPの平均値をLarcherと比較すると、森林では本報告の推定値とLarcherの報告はかなり近いが、農地では倍近い開きがある。農地での違いはPAL

データの作成方法に強く影響されていると考えられる。全球の植生図ですら、相互に比較すると植生項目の食い違いが大きいように、NPPの推定精度を向上するには検討すべき課題が多いと言えよう。

AVHRRデータは近年の衛星センサのデータに比べて情報量が少なく、適用できる解析法が限られる。本稿で紹介したモデルはシンプルであるが、NPPマップの特徴の多くはプロセスモデルなどを用いた他の研究の知見²⁰⁾に一致しており、AVHRRデータの資産を有効に活用できたと考えられる。

5. 今後の課題

本報告では、PALデータの問題点をクリアしながらNPP推定モデルを構築し、モデルの骨格はできあがった。しかしながら、全球の植生をほぼ一律に解析したため、幾つか問題がある。例えば、光合成に対する気温の閾値は10℃に設定しているので、ツンドラに対しては高すぎる。ツンドラのように地表面付近で生育する植生は、気温より高めの温度環境で生育していることもあるが²¹⁾、生育開始の気温は低い。このため、高緯度地域では7月マップのNPP値が急減する境界域が生じた(図2)。また、C3やC4植物といった光合成機構

表2 植生タイプ別のNPP.

IGBP植生タイプ ¹⁷⁾	面積 (10 ⁶ km ²)	NPP総量 (炭素Pg 年 ⁻¹)	NPP平均値 (炭素g 年 ⁻¹)	Larcher植生タイプ ¹⁾	平均値(Larcher) (炭素g m ⁻² 年 ⁻¹)
常緑針葉樹林	6.4	2.46	385.8	北方針葉樹林	360.0
常緑広葉樹林	12.1	11.94	988.3	熱帯雨林	990.0
落葉針葉樹林	2.0	0.59	300.8	(北方針葉樹林の一部)	360.0
落葉広葉樹林	3.2	2.02	623.8	温帯落葉樹林	540.0
混交林	6.3	2.63	421.1	*	-
閉鎖した灌木	2.6	1.05	409.1	乾性低木林・硬葉樹林	315.0
疎な灌木	18.1	2.97	164.4	*	-
木本性サバンナ	10.2	6.18	606.2	サバンナ	405.0
草原性サバンナ	9.3	5.44	583.4	サバンナ	405.0
草地	11.0	3.51	317.8	草原・ステップ	270.0
湿地	1.3	0.29	226.0	沼沢地	135.0
農地	14.0	8.08	575.6	農作物	292.5
市街地	0.3	0.13	518.5	*	-
農地と自然植生混在	13.9	8.93	639.9	*	-
雪氷	16.6	0.00	0.3	乾性・乾性砂漠	1.4
荒地・疎な植生	18.4	0.54	29.1	乾性・乾性砂漠	1.4
その他	0.0	0.00	0.0	*	-
小さな島	0.1	0.03	442.8	*	-
陸域全体	145.7	56.80	389.8	陸域	351.0

IGBP分類項目：AVHRR 1kmデータを用いて作られたIGBPカテゴリーの植生図を用いた。

*：IGBPに該当する植生タイプをLarcherでは絞りきれなかった。「混交林」は各森林項目に包含され、「疎な灌木」はサバンナの一部かもしれない。「農地と自然植生混在」は、Larcherの多くの項目に分散すると考えられる。「市街地」と「その他」に該当する項目はない。IGBP植生図では「小さな島」は無視されているが、PathFinderデータでは陸として扱われている。しかし、Larcherに該当する項目はない。

の違いは、本モデルでは全く考慮していない。このような問題点を改善し、NPPの推定精度を向上させるために、当面、以下のような点を改善する必要がある。

- 1) 植生タイプ毎に光利用効率を設定する。
- 2) 気温や土壌水分に関するストレス関数を改良し、植生や土壌タイプに応じて細分化する。
- 3) 衛星センサで観測される表面温度を利用する。

PALデータのもつ特徴ゆえに、プロセス研究の結果をそのまま当てはめることは難しく、時空間的な混合画素の影響を軽減して、これらの問題を改善する方法を検討する必要があるだろう。NPP推定モデルだけではなく、NPP推定に利用した気象データの精度がNPPの推定精度を左右することから、複数の気象データを用いてモデルの妥当性の検証を進めることも必要である。

6. おわりに

本稿では、NOAA衛星のPALデータを利用したNPPの推定例を紹介した。本稿で紹介したモデルは単純だが、ほぼ妥当な推定結果を得た。このモデルはPALデータが時空間的な混合画素であることなどを考慮して開発されており、1981年から今日に至るまでの長期のNPPモニタリングにも活用できると考えられる。

謝辞

本研究は主に、文部科学省総合研究「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度化に関する国際共同研究」で、一部は農林水産省「地球温暖化についてのモニタリング及び将来予測」で実施した。本研究の実施にあたり東海大学情報解析研究センターの下田陽久教授、東京大学生産技術研究所の安岡善文教授や、炭素循環プロジェクトのメンバーから有用な助言を頂いた。また、検証用のNPPデータの集約には鳥羽妙さんの助力を得た。記してお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Houghton, J.H., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van Der Linden and D. Xiaosu (eds.) (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- 2) Larcher, W. (佐伯敏郎監訳) (1999) *植物生態生理学*, シュプリンガー・ファラーク東京, 東京,

- 375 p.
- 3) RESTEC (2003) 総覧 世界の地球観測衛星 (CD-ROM). リモートセンシング技術センター, 東京.
- 4) Monteith, J.L. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766.
- 5) Prince, S.D. and S.N. Goward (1995) Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22, 815-835.
- 6) Ruimy, A., B. Saugier and G. Dedieu (1994) Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99, 5263-5283.
- 7) Gower, S.T., C.J. Kucharik and J.M. Norman (1999) Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70, 29-51.
- 8) Asrar, G. (ed.) (1988) *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New York. 734p.
- 9) Awaya, Y., E. Kodani, K. Tanaka, J. Liu, D. Zhuang and Y. Meng (2004) Estimation of the global net primary productivity using NOAA images and meteorological data: Changes between 1988 and 1993. *International Journal of Remote Sensing*, 25-9, 1597-1613.
- 10) Smith, P.M., S.N.V. Kalluri, S.D. Prince and R. DeFries (1997) The NOAA/NASA Pathfinder AVHRR 8-km land data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63-1, 12-13 & 27-32.
- 11) Townshend, J.R.G. and C.O. Justice (1986) Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 7-11, 1435-1445.
- 12) Uchijima, Z. and H. Seino (1985) Agroclimatic Evaluation of Net Primary Productivity of Natural Vegetations (1) Chikugo Model for Evaluating Net Primary Productivity. *Journal of Agricultural Meteorology*, 40, 343-352.
- 13) Vose, R. S., R.L. Schmoyer, P.M. Steurer, T.C. Peterson, H. Heim, T.R. Karl and J. Eischeid (1992) The Global Historical Climatology Network: long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data. ORNL/CDIAC-53, NDP-041. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.

- 14) Tsvetkov, A., S. Wilcox, D. Renne and M. Pulsak (1995) International Solar Resource Data at the World Radiation Data Center. *Proceedings of the 1995 American Solar Energy Society Annual Conference*, Minneapolis: ASES, 216-219.
- 15) Semikhatova, O.A., T.V. Gerasimenko and T.I. Ivanova (1992) Photosynthesis, respiration, and growth of plants in the Soviet Arctic. in *Arctic Ecosystems in a Changing Climate*, San Diego: Academic Press, 169-193.
- 16) Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne and D. Joseph (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77-3, 437-471.
- 17) Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- 18) 小倉義光 (1984) 大規模な大気の運動 (一般気象学). 東京大学出版会, 東京, 166-202.
- 19) Loveland, T.R., Z. Zhu, D.O. Ohlen, J.F. Brown, B.C. Reed and L. Yang (1999) An analysis of the IGBP global land-cover characterization process. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65 (9), 1021-1032.
- 20) Cramer, W., D.W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, B. Nemry, A. Ruimy, A.L. Schloss and the participants of the Potsdam NPP Model Intercomparison (1999) Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 5 (Suppl. 1), 1-15.
- 21) Walter, H. (1985) *Vegetation of the Earth*, 3rd edn., Berlin, Springer-Verlag.

(受付2004年3月3日、受理2004年5月25日)