気候要素を用いた純一次生産力の評価の試み

鳥谷 均・石郷岡康史
(農業環境技術研究所地球環境部)

An Approach to the Estimation of Net Primary Production Using Climatic Factors

Hitoshi TORITANI and Yasushi ISHIGOOKA

(Department of Earth Resource Sciences, National Institute for Agro-Environmental Sciences,
Tsukuba, 305-8604 Japan)

Abstract

We studied the relationship between climatic conditions, such as temperature, precipitation, and solar radiation, and net primary production (*NPP*) estimated using the Miami model for Japan, China, and other regions in Asia.

In the Miami model, *NPP* is constrained by either air temperature or precipitation. Our analysis showed that, in Japan, *NPP* is predominantly constrained by temperature, whereas precipitation is the major constraint factor in some portions of China, such as the region in the south of the Huang He River and in northwestern China.

We also clarified that in the period when the average temperature was 5 degrees Celsius or more and precipitation was 50% or more of potential evapotranspiration, *NPP* is mostly proportional to solar radiation. In the present study, we defined the amount of solar radiation under these conditions as production effective solar radiation (*PESR*). This factor indicated available solar radiation for *NPP*.

We further calculated the conversion coefficient with which *PESR* is converted into the *NPP* of natural vegetation. The conversion coefficient was 0.35 to 0.37 g MJ⁻¹ and in general agreement with the values derived from radiation use efficiency (*RUE*) presented by Monteith (1977).

A comparison of annual solar radiation (*ASR*) and *PESR* showed that *PESR* was up to 20% smaller in Japan, and up to 40% smaller than *ASR* in China. It showed that up to 40% of *ASR* does not contribute to *NPP* in some parts of Japan due to the constraint of air temperature, and that up to 20% of *ASR* is not utilized for *NPP* in the south of Huang He River due to the constraint of precipitation. The fraction of *ASR* that is not used by *NPP* was higher in India and Pakistan, where 20 to 60% of *ASR* does not play a role in the production of biomass due to the constraint of precipitation.

These results showed the possibility of estimating the *NPP* using *PESR* under climatic constraints in various types of vegetation.

Key words: Miami model, Net primary productivity(*NPP*), Production effective solar radiation (*PESR*)

キーワード: 純一次生産有効日射量 (*PESR*), 純一次生産力, マイアミモデル

1. はじめに

植物はその生育過程で、光合成と呼吸という生理反応を行っている。光合成は、ある一定の温度条件のもとで、光エネルギーを用いて二酸化炭素 (CO₂) と水から有機物を合成し、酸素 (O₂) を発生する反応である。呼吸は、

O₂ を取り入れて有機物を酸化し、CO₂ を放出する反応である。これら一連の生理的反応は、光エネルギーを化学エネルギーに変換し、蓄積あるいは消費する反応であり、これによって植物は生長し、その生体が維持される。ここで得られた正味の有機物量 (蓄積された化学エネルギー) は、純一次生産力 (net primary production, *NPP*) (バイオマス・エネルギー) として定義され、単位

2002年5月17日 受付, 2003年3月14日 受理

面積・単位時間当りの植物体の乾物重（バイオマス）として表される。

この *NPP* の推定方法に関しては、1970 年代に、国際生物学事業計画（International Biological Programme: IBP, 1965～1974）の *NPP* 資料をもとにしたものはいくつか提案されている。これらの推定法の多くは、陸上植物の生産に対して第一義的に影響を与えるのは水分と温度であるという考えから、気温と降水量などの気候要素と *NPP* との関係から作られている（Miami model: Lieth, 1973, 1975; Chikugo model: Uchijima and Seino, 1985）。

その後、植物生理分野での研究の発展にともない、C3 植物と C4 植物の光合成経路の違い、あるいは、植物体の構造（同化器官と非同化器官の比率など）や窒素施肥の違いなどによって、生産効率が異なることが明らかになった。そして、1990 年代になると、これらの生理的なプロセスがモデル化され、これに基づいたいくつかの *NPP* の推定手法が提案された（例えば、McGuire *et al.*, 1995, 1997; Potter *et al.*, 1993; Randall *et al.*, 1996; Running and Hunt, 1993; Sellers *et al.*, 1996a, b）。

これらの手法の多くは、陸上植物の炭素固定量に関する地球規模の分布を明らかにするために、現在の植生分布はどのように決定されているのか、そして、その植生分布のもとで *NPP* はどのように分布するのかということに注目している。そのため、各単位地域で卓越する植生を推定し、その植生に対応した生理的なパラメータを用いたプロセスモデルから *NPP* を推定している。しかし、植生分布と生理的なパラメータなどに関する資料や情報がけっして十分でないことから、各単位地域での植生の推定や各植生での *NPP* の推定などにいくらかの誤差を含み、これらの手法から推定した全球陸上植物の年間 *NPP* は 40～80 PgC の範囲にばらついているのが現状である（Cramer *et al.*, 1999）。

今世紀に予測される気候変化が、農業生産にどのような影響を与えるのかを明らかにすることは、農業気象分野においても重要な研究課題の一つである。また、*NPP* を指標として、農業生産への影響を評価することは常套手段である。また、この気候変化では、気温や降水量などの気候要素の絶対量が変化することはばかりではなく、それぞれの空間分布パターンも変化することが予想されることから、複雑に変化する気候要素がもたらす影響のシグナルを直接的に示すことができる *NPP* 評価手法が必要となる。さらに、農業生産の推定にとって重要な要素である作物の栽培地域とその生育期間は、気候条件によってほぼ規定されている。このような状況のもとで、

気候と *NPP* との関係を基本に作られた影響評価手法は依然として有効であると考えられる。

そこで、ここでは、植物生産の生理的なプロセスを念頭におきながら、改めて、気温、降水量、日射量という気候要素と *NPP* の関係とその分布を見直し、気候と *NPP* との関係をベースとする影響評価手法を改良するための糧となる資料の提示を試みることにする。

2. 方 法

本研究で用いた気象要素は、気温、降水量、日射量、水蒸気圧、そして風速であり、これらは IPCC Data Distribution Centre (DDC) で配布されている「CRU 05: 0.5 Degree 1961–1990 Mean Monthly Climatology」データセットから取得した（New *et al.*, 1999）。このデータセットは 20 世紀の気候変動が陸上生態系の炭素収支（炭素固定）にどのような影響を与えたかを評価する目的で作られたものであり、NMA (National Meteorological Agency), WMO (World Meteorological Organization), CRU (英国 East Anglia 大学環境科学部気候研究ユニット), CIAT (国際熱帯農業センター) などの機関が収集した 1961～1990 年の気温、降水量、日射量、水蒸気、風速に関する地点データ（気温：12,092 地点、降水量：19,295 地点、日射量：4,040 地点、水蒸気圧：3,887 地点、風速：3,615 地点）を、標高を考慮した thin-plate spline 法によって、緯度、経度それぞれ 0.5° のグリッドに内挿して作成したものである。なお、精度に関しては、クロス・バリデーションあるいは他の気候値との比較によって検証されている。また、このデータは IPCC Data Distribution Centre のホームページ (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>) から自由に取得することができる。

純一次生産力 (*NPP*) の空間分布は Miami モデルから求めた（Lieth, 1973; 1975）。Miami モデルは、IBP で得られた *NPP* と Climate Diagram World Atlas (Walter and Lieth, 1960–1967) に掲載されている気候要素（気温、降水量）との関係を関数として表したもので、下式のようになる。

$$NPP = \min \left\{ \frac{30}{1 + \exp(1.315 - 0.119T)}, 30(1 - \exp(-0.000664P)) \right\} \quad (1)$$

ここで、*NPP* は年純一次生産力 (t ha^{-1})、*T* は年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$)、*P* は年降水量 (mm) である。

前節で述べたように、Miami モデルは生産量測定に関する観測技術が確立されていなかった IBP の資料を用いて作られたものであり、大きなばらつきを含んでい

る。また、C3 植物と C4 植物の生産生理的な特徴や植物の構造の違いによる生産効率の差異を考慮していないという欠点があり、これによって推定された *NPP* は、第一近似的な性質をもつことは否定できない。しかし、全球陸上植物の年間 *NPP* の推定量が 49.3 Pg C (Okamoto *et al.*, 2000) であり、その値がやや小さいながら生理的なプロセスを考慮したモデルの推定値の範囲内であること、また、全球における *NPP* の空間分布パターンがプロセスモデルときわめて類似していること、気候要素から *NPP* を推定する Chikugo-Model の検証用資料として用いられていること、FAO (国際連合食糧農業機関) など国際機関で広く採用されていること、そして何よりも *NPP* の分布が容易に手に入るという長所をもっている。

以上のように、Miami モデルから推定した *NPP* にはいくつかの問題点があるが、気温、降水量、日射量などの気候要素の空間分布と比較・考察するうえで、その精度は十分に保たれていると考えられることから、Miami モデルの *NPP* 分布を採用することにする。

また、植物生産の水分条件を明らかにするために可能蒸発散量を用いるが、この可能蒸発散量は FAO Penman-Monteith 法 (Allen *et al.*, 1998) から求めた。

$$PET = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u)} \quad (2)$$

ここで、*PET* は可能蒸発散量 (mm day^{-1})、 R_n は正味放射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)、 G は地中熱流量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)、 T は高さ 2 m の気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 u は高さ 2 m の風速 (ms^{-1})、 $e_s - e_a$ は飽差 (kPa)、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の傾き ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 γ は乾湿計定数 ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$) である。また、 R_n は日射量から、 G は気温から推定した。

3. 結果と考察

3.1 *NPP* からみた気温と降水量の特徴

太陽放射は、光合成と呼吸という植物の最も基本的な生産生理過程により、純一次生産力 (*NPP*) に変換されるが、この過程には温度と水が必要となる。この温度と水に関係する気候要素が気温と降水量である。そこで、Fig. 1 に日本における年平均気温と年降水量の関係を示す。この解析で用いた CRU05: 0.5 Degree 1961–1990 Mean Monthly Climatology データセットによると、日本は、年平均気温が $0.5 \sim 23.5^{\circ}\text{C}$ 、年降水量が 951–2,862 mm の範囲に分布する。年平均気温の最低値は北海道東北部大雪山付近、最高値は小笠原諸島硫黄島、年降水量の最小値は北海道網走付近、最大値は熊本県阿蘇

Fig. 1. Relationships between annual air temperature and precipitation in Japan. Thick broken line indicates the boundary of air temperature- and precipitation-limiting zones, and thin ones indicates net primary production, by means of the Miami model (eq. (1)).

山付近に対応するグリッドで出現する。また、一般的に、年平均気温が高くなるにしたがって年降水量が大きくなる傾向を示す。しかし、年降水量が最大となるのは年平均気温が約 12°C の地点であり、年平均気温が 18°C 以上では気温が高くなるにしたがって降水量が減少している。また、年平均気温が $6 \sim 16^{\circ}\text{C}$ の地域では、年降水量の格差が大きいがわかる。

さて、植物の生産生理過程で温度と水が必要となることは先に述べたが、このことは、温度と水がこの過程を制約する要因であることを意味している。すなわち、気温と降水量という気候要素は *NPP* にとっての制約要因となるのである。そこで、日本で生育している植物の *NPP* が、気温あるいは降水量のどちらによりよく制約を受けるのかを考察する。

前節で示したように、Miami モデルは *NPP* を気候要素の関数として表したものであり、その関数型は、年平均気温から算出した *NPP* と年降水量から算出した *NPP* を比較し、気温からの値が小さければその場所の *NPP* は気温によって、降水量からの値が小さければその場所は降水量によって決まるという Liebig の法則に基づいている。このことは、気温から算出した値と降水量から算出した値の大小を比較することによって、その場所の *NPP* が、気温によって制約されているのか、降水量によって制約されているのかを評価できることを示している。

そこで、年平均気温から算出した *NPP* と年降水量から算出した *NPP* が等しいときの気温と降水量の関係を示す曲線を同じ Fig. 1 に太破線で示す。また、そのときの *NPP* の値を細破線で示す。この場合、この曲線の上側では、気温から算出した *NPP* が降水量から算出した *NPP* より小さいことから、*NPP* は気温によって決まる (*NPP* は気温の関数となる) 領域であり、気温が *NPP* の制約要因となる領域となる。これに対して、この曲線の下側では、降水量から算出された *NPP* が気温から算出された *NPP* より小さく、降水量によって *NPP* が決まる (*NPP* は降水量の関数となる) 領域であり、降水量が *NPP* の制約要因となる領域となる。

日本では、プロットした点のほとんどがこの曲線の上側にあることから、ほとんどの地域で *NPP* が気温の制約を受けることがわかる。気温が $12\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、 20°C 以上で、この曲線の下側、すなわち、*NPP* が降水量によって制約される領域がある。これらの点は、関東地方および瀬戸内地域の一部、沖縄から琉球諸島の地域に対応する (Fig. 2)。

ユーラシア大陸東岸に位置する、中国の年平均気温と年降水量の関係を Fig. 3 に示す。中国は、年平均気温が $-12.1\sim 25.4^{\circ}\text{C}$ 、年降水量が $12\sim 2,199\text{ mm}$ の範囲に分布する。年平均気温の最低値はティエンジャン (天山) 山脈、最高値はハイナン (海南) 島、年降水量の最小値はタクラマカン (塔克拉玛干) 砂漠東部、最大値はホンコン (香港) 付近に対応するグリッドで出現する。点の集合は年平均気温が高くなるにつれて年降水量が大きくなる傾向を示すが、年平均気温が $8\sim 13^{\circ}\text{C}$ 以上の範囲で年降水量が 200 mm 以下の点が数多く存在する。これら

の点は、前述のタクラマカン砂漠やバダインジャラン (巴丹吉林)、ゴビ砂漠のグリッドに対応する。

Fig. 1 と同様に、*NPP* が等しいときの気温と降水量の関係を示す曲線を Fig. 3 に太破線で示す。この図から、この曲線の下側に分布する点が上に分布する点よりかなり多いこと、すなわち、中国では、*NPP* に関して降水量が制約要因となる地域の方が、気温が制約要因となる地域よりもかなり広いことがわかる。この曲線の上側、すなわち、*NPP* が気温の制約を受ける地域のほとんどは、年平均気温が $-10\sim 10^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布している。これらの点は、中国西部のチンハイ (青海) 省からチベット自治区、北部のチーリン (吉林) 省東部、ヘイロンチアン (黒龍江) 省、ネイモンクー (内モンゴル) 自治区北部、南東部のアンホイ (安徽) 省南部からチアンシー (江西) 省北部の一部の地域のグリッドに対応する。これに対して、この曲線の下側では、気温の上昇により降水量が増大する点の集合があるが、これらは中国北部から東部に広がる地域 (ホワイペイ平原、華北平原) のグリッドに対応する (Fig. 4)。

3.2 *NPP* からみた日射量の特徴

日本に関して、CRU05 データセットによる年日射量と、Miami モデルを用いて求めた年間の *NPP* との関係を Fig. 5 に×印で示す。横軸となる日射量は、植物が生育期間中に吸収した光合成に有効な日射量 (光合成有効放射量, *PAR*) を用いるべきであるが、ここでは地表面が受ける年日射量で代用した。この図から、日本では、年日射量は $4,000\sim 6,000\text{ MJ m}^{-2}\text{ y}^{-1}$ 、年 *NPP* は $600\sim 2,400\text{ g m}^{-2}\text{ y}^{-1}$ の範囲に分布することがわかる。また、両者には比例関係が見られ、地表面が受ける日射量が増

Fig. 2. Spatial distribution of air temperature (×) and precipitation-limiting areas (+) in Japan.

Fig. 3. Relationships between annual air temperature and precipitation in China same as Fig. 1.

加すると *NPP* も増加することがわかる。

さて、光合成と呼吸という植物のもつ生産生理過程が、気温と降水量によって制約を受け、低温や乾燥によって阻害されることは前に述べた通りである。吉良(1945)は生育条件の指標として温度指数を定義し、生理的零点を 5°C とした。そこで、ここでは、月平均気温が 5°C 以上の期間を生育期間とし、この期間に植物に到達する日射量と *NPP* に何らかの関係があると考えた。

Fig. 4. Spatial distribution of air temperature- and precipitation-limiting areas in China same as Fig. 3.

Fig. 5. Relationships between solar radiation and net primary production (*NPP*) in Japan. $\times$ indicates the relationships of 12 month' accumulated values of solar radiation and $\circ$ indicates ones of the values of accumulated solar radiation during the months when air temperature is over 5 degrees Celsius, to net primary production.

月平均気温が 5°C 以上の月の日射量の積算値を横軸にとり、これと *NPP* との関係を見たものが Fig. 5 の $\circ$ 印である。平均気温が 5°C 以上の月の日射量の積算値は $2,000 \sim 6,000 \text{ MJ m}^{-2}$ に分布する。また、*NPP* が小さくなるにしたがい、 5°C 以上の月の日射量の積算値は年日射量よりも小さくなり、これらの点は原点を通る直線上(傾きが約 0.37 g MJ^{-1}) に分布するようになる。

中国に関して、年日射量と *NPP* との関係を示す。日本では、ほとんどの地域で *NPP* が気温の制約を受けるが、中国では、Fig. 3 と Fig. 4 で示したように、気温の制約を受ける地域と降水量の制約を受ける地域があるので、それぞれ、Fig. 6, Fig. 7 に $\times$ 印で示した。気温の制約を受ける地域では、年日射量は $4,000 \sim 7,000 \text{ MJ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、*NPP* は $170 \sim 2,000 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の範囲に分布している。日射量と *NPP* には $5,000 \text{ MJ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ まで比例関係が見られるが、 $5,000 \text{ MJ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 以上になると、日射量とともに *NPP* が増加する地域と減少する地域があり、それらの点にばらつきが見られる (Fig. 6 の $\times$ 印)。これに対して、降水量の制約を受ける地域では、年日射量は $4,500 \sim 7,000 \text{ MJ m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 、*NPP* は $20 \sim 2,300 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の範囲に分布し、両者に反比例の関係が見られ、年日射量が増加すると *NPP* は急激に減少する (Fig. 7 $\times$ 印)。

日本と同じように、中国に関しても気温の制約を考え、平均気温が 5°C 以上の月の日射量の積算値を横軸にとり、これと *NPP* との関係を Fig. 6, Fig. 7 に $\circ$ で示す。気温によって制約を受ける地域では、日射量の積算値とともに *NPP* は増加する比例関係が見られる (Fig. 6 $\circ$ 印)。これに対して、降水量の制約を受ける地域では、日射量の積算値が $3,000 \text{ MJ m}^{-2}$ までは *NPP* は $0 \sim 500 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ の範囲に分布しており、 $4,000 \text{ MJ m}^{-2}$ 以上では、日射量の積算値の増加とともに *NPP* が増加する部分と、急激に減少する部分があり、日射量の積算値と *NPP* の間に明らかな関係が見られない (Fig. 7 $\circ$ 印)。これは、降水量の制約を受ける地域で日射量と *NPP* を考えるためには、降水量の制約を評価する基準を考慮する必要があることを示している。

穀物の播種あるいは生育は、降水量が可能蒸発散量 (*PET*) の 50% 以上であれば可能であると考えられている (Doorenbos *et al.*, 1977; 1979)。そこで、降水量が *PET* の 50% 以上となる月の日射量の積算値を横軸にとり、これと *NPP* との関係を Fig. 8 に示した。気温の制約を受ける地域 ($\blacktriangle$)、降水量の制約を受ける地域 (∇) とそれぞれ、日射量の積算値と *NPP* の関係を示す点は、原点を通り、傾きのほぼ等しい (約 0.35 g MJ^{-1}) 直線上に分布する。

これらのことは、「平均気温が 5°C 以下」または「降水

Fig. 6. Relationships between solar radiation and *NPP* in air temperature-limiting area of China same as Fig. 5.

Fig. 7. Relationships between solar radiation and *NPP* in the precipitation-limiting area of China same as Fig. 5.

量が *PET* の 50% 以下」の月では温度および水による制約を受けるために、植物は日射を受けても純一次生産を行わない、これに対して、「月平均気温が 5℃ 以上」かつ「月降水量が月 *PET* の 50% 以上」の月では、日射を受けて純一次生産が行われ、*NPP* はその日射量に比例すると考えることができることを示している。以上のように、この「月平均気温が 5℃ 以上」かつ「月降水量が月 *PET* の 50% 以上」という条件は日射と *NPP* との関係を考えるうえで重要な条件であり、これらを満たす期間は、植物の生育期間と見なせることがわかる。

Fig. 8. Relationships between solar radiation and *NPP* in the air temperature- (▲) and precipitation-limiting area (▽) of China. The values of solar radiation are accumulated during the months when air temperature is over 5 degrees Celsius and precipitation is over half of potential evapotranspiration.

3.3 日射量から *NPP* への変換係数

前節で、「月平均気温が 5℃ 以上」かつ「月降水量が月 *PET* の 50% 以上」と定義した期間における日射量の積算値と *NPP* はほぼ比例関係にあり、原点を通る直線上に分布していることが明らかになった。この傾きは、日本では約 0.37 (Fig. 5)、中国では 0.35 (Fig. 8) となるが、これは、地表面で 1 MJ の日射量を受けたときに、それぞれ 0.37 g、0.35 g の *NPP* があることを示す。この差はデータや解析方法からみて誤差範囲であり、両国ともにほぼ同じ値をとるものと考えられる。

ここで、この傾きについて検討する。日射量のうち光合成に利用される部分、すなわち、光合成有効放射量の割合は約 50% である。この光合成有効放射量はおもに植物の葉によって吸収されるが、その吸収比は生育期間の葉の展開とその構造によって大きく変化することが知られている。自然植生を森林と考えた場合、この吸収比は常緑樹では生育期間全体を通して 35~75%、落葉樹では 25~40% となる (Field *et al.*, 1995)。さらに、植物の乾物生産量、すなわち *NPP* は葉によって吸収された光合成有効放射量に比例する (Monteith, 1977) とされ、吸収された光合成有効放射量 1 MJ あたりの *NPP* は、常緑樹では約 1.4 g、落葉樹では約 2.5 g である (Gower *et al.*, 1999)。これらの値を検討すると、地表面で 1 MJ の日射量を受けたときに、常緑樹では 0.25~

0.50 g, 落葉樹では 0.30~0.50 g の *NPP* が見込まれる。Fig. 5 と Fig. 8 から得られた数値はこの範囲に含まれており、このことから、この数値と「月平均気温が 5℃ 以上」かつ「月降水量が月 *PET* の 50% 以上」の月の日射量の積算値を用いると、その地域における *NPP* が推定できることを示している。以上のことから、「月平均気温が 5℃ 以上」かつ「月降水量が月 *PET* の 50% 以上」の月の日射量の積算値を純一次生産有効日射量 (*PESR*) と定義する。

3.4 東南アジア地域の日射量の分布

東南アジア地域における、年日射量, *PESR*, を Fig. 9 (a), (b) に、その両者の比の分布を Fig. 10 に示す。

日本では、年日射量は $4,000 \sim 6,000 \text{ MJ m}^{-2}$, *PESR* は $2,000 \sim 6,000 \text{ MJ m}^{-2}$ となる。そして、両者の比は 0.6~1.0 に分布する。1.0 に満たない地域は、「月平均気温が 5℃ 以下の月」または「降水量が *PET* の 50% 以下となる月」が年間に少なくとも 1 カ月あり、気温または降水量の制約のために、*PESR*, すなわち、純一次生産に利用できる日射量が年日射量よりも小さいことを示している。

中国では、年日射量は $4,000 \sim 7,000 \text{ MJ m}^{-2}$, *PESR* は $0 \sim 6,000 \text{ MJ m}^{-2}$ に分布している。気温に制約されるチーリン省東部、ヘイロンチアン省、ネイモンクー自治区北部、南東部のアンホイ省南部からチアンシー江西省北部の一部の地域では両者の比が 0.4~0.6, チンハイ青海省からチベット自治区では 0.4~0.8 となる。これに対して、降水量の制約を受けている地域のなかでも、黄河以南のホワイペイ平原では 0.8~1.0 とかなり高い値をとる。ここは降水によって制約される地域であるが、そのなかでも比較的、降水量に恵まれ、年日射量の 80% 以上を純一次生産に利用することが可能であることがわかる。

目を東南アジアに向けると、日射量の年積算値は、インドからパキスタン、インドネシアのジャワ島の一部で大きく、 $7,000 \text{ MJ m}^{-2}$ 以上、その他の東南アジア地域でも $5,000 \text{ MJ m}^{-2}$ 以上になる。これに対して、*PESR* は、年積算値が大きかったインドからパキスタンでは $3,000 \text{ MJ m}^{-2}$ 以下、インドシナ半島やフィリピン西海岸では $3,000 \sim 5,000 \text{ MJ m}^{-2}$ となる。マレー半島からスマトラ、カリマンタン (ボルネオ)、ニューギニア島では、 $5,000 \sim 7,000 \text{ MJ m}^{-2}$ となり、年日射量とほぼ同じ値をとる。この結果、両者の比は、インドからパキスタンのほとんどの地域では 0.4 以下、インドシナ半島で 0.4~0.8 となる。これは、これらの地域で、*PESR*, すなわち、純一次生産に利用できる日射量は、降水量の制約により年日射量のそれぞれ 40% 以下、40~80% となることを

示している。

4. ま と め

光合成と呼吸という植物のもつ生産生理過程を考慮しながら、気温、降水量、日射量などの気候要素と自然植生の純一次生産力 (*NPP*) との関係を、Miami モデルから求めた *NPP* を用いて、明らかにした。

自然植生の *NPP* は気温と降水量によって制約を受ける。Miami モデルから考察すると、日本ではおもに気温による制約を、中国の黄河以南や北西部ではおもに降水量による制約を受けることがわかる。

また、気候要素と *NPP* との関係から、「平均気温が 5℃ 以上」かつ「降水量が可能蒸発散量 (*PET*) の 50% 以上」の月の日射量の積算値と *NPP* はほぼ比例することが明らかになった。このことは、上記の条件を満たす月の日射量によって、その地域の *NPP* を推定できることを示している。そこで、本研究では、「平均気温が 5℃ 以上」かつ「降水量が可能蒸発散量 (*PET*) の 50% 以上」という条件を満たす月の日射量を積算した値を純一次生産有効日射量 (*PESR*) と定義した。

日本と中国の *PESR* と *NPP* との関係から、日射量から自然植生の *NPP* への変換係数 $0.35 \sim 0.37 \text{ g MJ}^{-1}$ を得る。この変換係数は、Monteith (1977) によって提示された放射乾物変換係数 (*RUE*) から求められた数値とほぼ一致する。

年日射量と *PESR* を比較検討すると、日本では、年日射量の 0~40% は気温の制約によって、中国黄河以南では年日射量の 0~20% は降水量の制約によって純一次生産に寄与しない。インドやパキスタン、インドシナ半島では、この比率が高くなり、年日射量 20~60% は降水量の制約によって純一次生産に寄与しないことが明らかになった。

以上述べたことは、植生単位あるいは作物ごとに変換係数を定めることによって、気候値から *NPP* を推定すること、また、これらのことから気候変化による *NPP* への影響を評価することが可能であることを示唆するものである。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、農業環境技術研究所地球環境部気象研究グループ気候資源ユニットの桑形恒男博士と小林和彦博士、生態システム研究グループリモセンユニットの大野宏之博士、食料生産予測チームの岡本勝男博士と横沢正幸博士には貴重な助言をいただいた。記して厚く感謝申し上げる。なお、本研究には、文部科学省科学技術振興調整費総合研究「炭素循環に関す

Fig. 9. Spatial distributions of annual solar radiation (a), and the accumulated values of solar radiation during the months when air temperature is over 5 degrees Celsius and precipitation is over half of potential evapotranspiration (b).

Fig. 10. Spatial distribution of the ratio of annual solar radiation and the accumulated values of solar radiation during the months when air temperature is over 5 degrees Celsius and precipitation is over half of potential evapotranspiration.

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」の一部を使用した。

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 pp.
- Cramer, W., Kicklighter, D. W., Bondeau, A., Moore III, B., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A., Schloss, A. L. 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 Biol.*, 5 (Suppl. 1), 1-15.
- Doorenbos, J., Kassam, A. H., Bentvelsen, C. L. M., Branscheid, V., Plusje, J. M. G. A., Smith, M., Uittenbogaard, G. O. and Van der Wal, H. K., 1979: *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 193 pp.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O., Aboukhaled, A., Damagnez, J., Dastane, N. G., Van Den Berg, C., Rijtema, P. E., Ashford, O. M. and Frere, M., 1977: *Crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 144 pp.
- Field, C. B., Randerson, J. T. and Malmstrom, C. M., 1995: Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 51, 74-88.
- Gower, S. T., Kucharik, C. J. and Norman, J. M., 1999: Direct and indirect estimation of leaf area index, fapar, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 70, 29-51.
- Kira, T., 1945: *New climate classification of East Asia based on agriculture geography*. Laboratory of Horticulture, Kyoto University, Kyoto, 23 pp. (吉良龍夫, 1945: 農業地理学の基礎としての東亜の気候区分. 京都帝国大学農学部園芸学研究室, 京都, 23 pp.).
- Lieth, H., 1973: Primary production: Terrestrial ecosystems. *J. Hum. Ecol.*, 1, 303-332.
- Lieth, H., 1975: Modeling the primary productivity of the world. In *Primary productivity of the biosphere* (eds. by Lieth, H. and Whittaker, R. H.). Springer-Verlag, New York, pp. 237-263.
- McGuire, A. D., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W. and Joyce, L. A., 1995: Equilibrium responses of soil carbon to climate change—empirical and process-based estimates. *J. Biogeogr.*, 22, 785-

- 796.
- McGuire, A. D., Melillo, J. M., Kichlighter, D. W., Pan, Y., Xiao, X., Helfrich, J., Moore III, B., Vorosmarty, C. J. and Schoss, A. L., 1997: Equilibrium responses of net primary production and carbon storage to doubled atmospheric carbon dioxide: Sensitivity to change in vegetation nitrogen concentration. *Global Biochem. Cycles*, **11**, 173–189.
- Monteith, J. L., 1977: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc.*, **B281**, 277–294.
- New, M., Hulme, M. and Jones, P., 1999: Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate*, **12**, 829–856.
- Okamoto, K., Yokozawa, M. and Kawashima, H., 2000: Impact of climate change on agricultural production and carbon cycle. In *EMEA2000: Environmental monitoring in East Asia—Remote sensing and forests— (ISSN: 1345-1553)*. Kanazawa Univ., Kanazawa, pp. 103–118.
- Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A. and Klooster, S. A., 1993: Terrestrial ecosystem production—a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem. Cycle*, **7**, 811–841.
- Randall, D. A., Dazlich, D. A., Zhang, C., Denning, A. S., Sellers, P. J., Tucker, C. J., Bounoua, L., Berry, J. A., Collatz, G. J., Field, C. B., Los, S. O., Justice, C. O. and Fung, I., 1996: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 3: The greening of the Colorado State University General Circulation Model. *J. Climate*, **9**, 738–763.
- Running, S. W. and Hurt, E. R., 1993: Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, Biome-BGC, and an application for global-scale models. Scaling processes between leaf and landscape levels. In *Scaling physiological processes: Leaf to globe* (eds. by Ehleringer, J. R. and Field, C. B.). Academic Press, San Diego, pp. 141–158.
- Sellers, P. J., Los, S. O., Tucker, C. J., Justice, C. O., Dazlich, D. A., Collatz, G. J. and Randall, D. A., 1996a: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate*, **9**, 706–737.
- Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D. and Bounoua, L., 1996b: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 1: Model formulation. *J. Climate*, **9**, 676–705.
- Uchijima, Z. and Seino, H., 1985: Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations. (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. *J. Agric. Meteorol.*, **40**, 343–352.
- Walter, H. and Lieth, H., 1960–1967: *Climate diagram world atlas*. Fischer, Jena.