東アジア陸域生態系の純一次生産力に関する プロセスモデルを用いた高分解能マッピング

伊 藤 昭 彦

(地球フロンティア研究システム)

High-Resolution Mapping of the Net Primary Productivity of Terrestrial Ecosystems in East Asia Using a Process-Based Model

Akihiko Ito

(Frontier Research System for Global Change, Yokohama, 236-0001 Japan)

Abstract

This paper presents a high-precision map of terrestrial net primary productivity (*NPP*) in East Asia (20° to 60° N, 100° to 170° E; 10.4×10^6 km²), using a high-resolution process-based model (Sim-CYCLE). Using recent datasets of land cover (46 types), soil, and topography, an *NPP* map of East Asia was obtained, at the spatial resolution of as high as 5-minutes: i.e., 6 to 12 times finer than previous ones. The calculated *NPP* values were compared with observations and several other models, to verify the model validity. Total annual *NPP*, 5.06 Pg C, was close to those with empirical models, and seasonal variation in *NPP* was consistent with that based on remote sensing data. Based on the estimated *NPP*, radiation-use efficiency (average $0.28 \text{ g C MJ}^{-1} \text{ PAR}$) and water-use efficiency (average 1.54 g C kg^{-1} evaporation) were calculated. The new mapping was especially effective for retrieving spatial heterogeneity due to steep topography and intensive land-use conversion, which was overlooked in previous coarse mappings. Compared with other approaches based on empirical relationships or satellite data, the process-based model is advantageous for exploring whole carbon dynamics (i.e. net ecosystem production) and future projection.

Key words: East Asia, High-resolution mapping, Net primary productivity (*NPP*),

Process-based model, Terrestrial ecosystem.

キーワード: 東アジア, 陸域生態系, 純一次生産力 (*NPP*), 高分解能マッピング, プロセスモデル

1. 緒 言

緑色植物による物質生産を示す純一次生産力 (*NPP*) は、代表的な生態系機能の指標として植物生態学あるいは農業気象学で広く用いられてきた (Roy *et al.*, 2001)。近年、生理生態学的な知見に基づいて生態系機能 (炭素循環など) を扱うモデルが多数構築されており、経験的モデルや衛星データに基づく推定と並んで、*NPP* の有力な推定手法となっている。しかし、いくつかの誤差要因により、これらのメカニスティックなモデル推定が十分な精度を持っているとは見なされていない。例えば、研究間で使用する基礎データが異なること、出力値の検証データが未整備であること、モデル実験において

「定常状態の生態系を扱う」といった仮定を設定する場合があることなどが、不確実性の原因となっていた。

本研究では、もう一つの重要な問題である、モデル計算の空間分解能の不十分さについて検討を行った。従来のモデル計算では、入力データの分解能や計算機性能に制約された非常に粗い空間分解能 (約 $100 \sim 50 \text{ km}$ 四方など) を用いていた。しかし、一般に景域 (landscape) と呼ばれる数平方キロ四方以下のスケールで、陸上植生には地形・微気象・土壌条件を反映した空間的変異が存在しており、人為的な耕作地化や都市化が加わることでさらに不均質性が高まっている。ここでは、最近整備が進んでいる高分解能 ($1 \sim 10 \text{ km}$ 間隔) の全球データを用いた、植物生態学に基づくメカニスティックな炭素循環モデルによる計算結果を提示する。この手法により、従来は無視されていた景域スケールの空間的変異性を考

慮し、東アジアなどの広域的な *NPP* の推定を高い精度で推定可能になると期待される。このようなモデル研究は、変動環境下での陸上生態系応答を解明し、陸域への炭素吸収機能を評価する上で、基礎的な重要性を持つと考えられる。

2. 方 法

2.1 対象地域とメッシュの設定, 使用データ

本研究では、我々の属する東アジアを研究対象とした (Fig. 1)。ここでは便宜的に $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$ の領域を東アジアとするが、その範囲には亜熱帯から亜寒帯へ、また海洋性の湿潤地域から内陸性の乾燥地域への顕著な環境傾度が存在し、耕作地化や都市化の影響の程度も場所ごとに大きく異なっている。その領域内に、緯度-経度方向に各 $5'$ (分) の空間分解能を持つメッシュを設定し ($9.26\sim 4.63\text{ km}$ 間隔), 各格子点について個別にモデル計算を実行するものとする。

土地被覆データとしては、米国地質調査所 (USGS) による 1 km メッシュデータ (Loveland and Belward, 1997) を使用した。この衛星情報に基づくデータには 94 種類の土地被覆区分が設定されており、 1 km 間隔のデータをモデルの $5'$ 間隔の格子ごとに集計し、個別のレイヤーに収納して使用した。東アジア地域内には、46 種類の土地被覆タイプが出現しており、「水田」と「短茎

草原」が各 106 万 km^2 で最大の面積を占めていた (Table 1)。東アジア地域の特色の 1 つは耕作強度が高いことであるが、耕作地 (全 13 種類) の総面積は 236 万 km^2 に及んでいた (陸地面積の 24.7%)。一方、森林 (全 17 種類) の面積は 337 万 km^2 であった (同 31.7%)。これらの植生タイプは、生理生態学的パラメータ値の差によりモデル内で区別して扱われている。そして各格子では、内部に出現する全ての植生タイプについてモデル計算を行い、面積加重することで格子点の代表値を求めた。

各格子における気候・土壌・地形条件は Fig. 1 に示したデータセットを参照した。土壌 (IGBP-DIS, 2000) と地形要因 (NGDC, 1983) に関しては $5'$ メッシュの全球データが作成されているが、気候要因に関しては相当以上の分解能を持つ全球データセットが作成されていないので、低分解能データ (ここでは米国 NCEP/NCAR 再解析データ) を内挿して使用した。温度要因に関しては地形データを基に $5'$ メッシュでの高度補正 ($0.6^{\circ}\text{C } 100\text{ m}^{-1}$ の温度遞減率) を行ったが、雲量・降水量・風速に関する微地形の影響は内挿時には考慮されていない。

2.2 生産力と生産効率

正味の乾物生産力である *NPP* は総一次生産 (*GPP*) と独立栄養的呼吸 (*AR*) の差から計算される。

Fig. 1. Study area of the East Asian region. This map also indicates observation sites of net primary production (*NPP*), as described in Table 3.

Table 1. Biome composition of the East Asia region. Mean annual temperature (T_{ann}) and annual precipitation (P_{ann}) are also listed.

No.	Biome	Area 10 ³ km ²	Mean annual climate	
			T_{ann} °C	P_{ann} kg H ₂ O m ⁻² yr ⁻¹
1	Rice paddy and field	1,066.4	15.9	1,478
2	Low sparse grassland	1,060.2	1.1	400
3	Deciduous conifer forest	845.4	-6.2	673
4	Woody savanna	840.1	1.8	980
5	Cool mixed forest	793.0	0.0	727
6	Deciduous and mixed boreal forest	767.2	-3.3	681
7	Crops and town	712.4	8.7	1,029
8	Crops, grass, shrubs	699.5	11.4	1,297
9	Semi desert shrubs	551.0	6.1	195
10	Cold grassland	448.4	2.1	1,009
11	Mixed forest	374.7	14.7	1,533
12	Deciduous broadleaf forest	231.9	9.5	1,176
13	Small leaf mixed woods	211.0	-2.8	602
14	Cool grasses and shrubs	170.7	7.6	432
15	Wooded tundra	169.9	-4.9	579
16	Conifer boreal forest	164.7	-2.5	593
17	Forest and field	151.9	15.2	1,719
18	Savanna (woods)	150.2	6.6	834
19	Shrub evergreen	146.7	13.0	1,474
20	Shrub deciduous	146.5	12.1	1,285
21	Conifer forest	112.2	16.7	1,930
22	Fields and woody savanna	106.6	9.6	724
23	Tropical rainforest	93.3	16.9	1,881
24	Grass crops	70.8	3.8	812
25	Cool irrigated cropland	62.6	2.8	849
26	Irrigated grassland	46.8	19.9	2,009
27	Rain green tropical forest	43.8	16.1	1,870
28	Barren tundra	38.9	-4.4	564
29	Upland tundra	36.2	-3.8	585
30	Marsh wetland	35.8	1.5	877
31	Mire, bog, fen	29.7	-6.1	534
32	Hot irrigated cropland	15.0	16.3	1,625
33	Narrow conifers	13.1	-3.1	610
34	Cool conifer forest	5.5	11.2	1,505
35	Semi desert	5.0	4.4	943
36	Heath scrub	5.0	-7.0	556
37	Polar and alpine desert	3.3	-5.7	527
38	Deciduous tree crop	2.8	17.9	1,705
39	Seasonal tropical forest	2.3	16.9	1,441
40	Cool forest and field	1.6	0.8	854
41	Sand desert	1.4	13.9	861
42	Tropical degraded forest	1.0	12.1	1,315
43	Cool fields and woods	0.9	4.1	940
44	Evergreen forest and fields	0.4	5.1	876
45	Cool crops and towns	0.4	5.7	809
46	Deciduous broadleaf forest	0.02	0.4	740
Total		10,436.2		

$$NPP = GPP - AR$$

(1)

現場での *NPP* 測定には、一定期間中の枯死物量 (*LF*) とバイオマス増加量 (*ΔW*) から *NPP* を計算する「積み

上げ法」が用いられる場合が多い(被食量は無視する)。

そこでは *NPP* を地上部 (*ANPP*) と地下部 (*BNPP*) に分離して扱うことが多い。これらは以下のように定義さ

れ、後述する炭素循環モデルにおいて対応するコンパートメントから計算することができる(f , c , r はそれぞれ葉、幹枝、根を指す)。

$$NPP = LF + \Delta W = ANPP + BNPP \quad (2)$$

$$ANPP = (LF_f + LF_c) + (\Delta W_f + \Delta W_c) \quad (3)$$

$$BNPP = LF_r + \Delta W_r \quad (4)$$

乾物生産における水分および日射エネルギーの利用効率は、生態系機能の重要な指標となる。 NPP の水利用効率(WUE)および放射利用効率(RUE)についても、モデル中で推定された水分収支や放射収支に基づいて計算を行った(後出の Table 4 参照)。

2.3 炭素循環のプロセスモデル

各種陸域生態系における炭素動態は、植物と土壌の生理生態学的過程に基礎をおくプロセスモデルの一つである Sim-CYCLE (Simulation model of Carbon cYCLE in Land Ecosystems) (Ito and Oikawa, 2002) を用いてシミュレートした (Fig. 2)。Sim-CYCLE において生態系構造は簡便なコンパートメントモデルとして扱い、光合成・呼吸・分配・枯死・分解に関する 16 種類の炭素フローを逐次計算して現存量の時間変化を求める。農業生態系においては植栽と収穫による炭素フローも含まれるが、現段階では施肥・間引きなどは含まれておらず、また全て春に播種し秋に収穫する一期作を設定している。炭素フローのモデル化に関する推定法と代表的なパラメータを Table 2 に示した。

Sim-CYCLE は植生の成長過程を明示的に含んでいるので、炭素貯留量・生産力の短期～長期的な時間変化を表現することが可能な点が重要な特徴である。本研究では各コンパートメントの現存量 10 g C m^{-2} の初期状態から、年間の正味炭素収支が十分にゼロに近づいた定常状態までの繰り返し計算を行った。なお、ここでは計算を 1 カ月ステップで行っているため、前記の NPP , GPP , AR は年間の結果を合計して得られる。任意の日 i の日総一次生産量 (GPP_i , $\text{g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) は、個葉レベルの総光合成速度 (A , $\text{g C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を葉面積指数 (F , $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) と日長 (L , s) について積分することで得られる。そこでは個葉の光-光合成速度関係は直角双曲線で表されている。

$$GPP_i = \int_L \int_F A dt df \quad (5)$$

$$A = A_{\max} \cdot \Phi \cdot PPFD / (A_{\max} + \Phi \cdot PPFD) \quad (6)$$

ここで、 $A_{\max}$: 光飽和時の個葉光合成速度 ($\text{g C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 Φ : 光-光合成曲線の初期勾配 (量子収率) ($\text{g C mol}^{-1} \text{ photon}$)、 $PPFD$: 葉に入射する光合成有効フラックス密度 ($\text{mol photon m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) である。 $PPFD$ は、気候データに基づく群落上端における光合成有効放射 (PAR) と、キャノピー内での光減衰を考慮して推定される。 PAR は、まず緯度・季節・雲量 (気候値) から直達光と散乱光を計算し、それぞれの光合成に有効な波長帯成分 (PAR) の割合を乗じて推定した (Shibata and Uchijima, 1987)。キャノピー内部では Monsi and

Fig. 2. Schematic diagram of the high-resolution mapping, with respect to input data, model structure, and output data.

Table 2. Overview of Sim-CYCLE (see Ito and Oikawa (2002) for details).

Process	Synopsis	Environmental dependence	Key parameters
<i>PAR</i>	Iqbal's empirical model. Diffused radiation and direct radiation are separated.	Latitude, season, cloudiness	—
Net radiation (R_n)	Albedo model for shortwave radiation, and empirical model for longwave radiation.	<i>VPD</i> , surface temperature, cloudiness	Albedo, snow cover
Evapotranspiration	Penman-Monteith model is used for potential evapotranspiration, limited by available water (soil moisture and precipitation).	Temperature, wind, soil water, precipitation, <i>VPD</i>	Canopy conductance
Photosynthesis	Empirical single-leaf gas exchange is scaled up to canopy scale, based on the Monsi-Saeki theory.	Temperature, soil water, <i>PPFD</i> , day-length, atmospheric CO_2	Quantum yield, light-saturated photosynthetic rate, <i>LAI</i> , light attenuation coefficient
Respiration	2-component model (growth and maintenance) with exponential temperature response for maintenance respiration.	Temperature	Specific respiration rate, Q_{10}
Allocation	Theoretically optimal <i>LAI</i> determines allocation to leaf. Allometric shoot-root proportion is considered.	(Indirectly on photosynthesis and leaf phenology)	Optimum <i>LAI</i> , root/shoot ratio
Litterfall	Constant senescence rate and seasonal deciduousness.	Temperature, precipitation (leaf phenology)	Specific mortality
Decomposition	2-layer model. Dependent on soil moisture and temperature.	Soil moisture, soil temperature	Specific decomposition rate

Saeki (1953) による指数関数的光減衰が考慮されている (減衰係数 (K) は植生タイプと太陽高度に依存)。そのため、キャノピーで吸収される光合成有効放射 ($APAR$, $MJ\ m^{-2}\ yr^{-1}$) は次式で表される。

$$APAR = PAR \cdot fAPAR \\ = PAR \cdot [1.0 - \exp(-K \cdot LAI)] \quad (7)$$

ここで $fAPAR$ は入射に占めるキャノピーによる吸収の割合である。一方、植生の呼吸量は、維持呼吸 (ARM) と成長呼吸 (ARG) の 2 コンポーネントモデルを用いて計算される。

$$AR_i = ARM + ARG \\ = \sum_{x=organ}^{leaf} (SARM_x \cdot W_x + SARG_x \cdot \Delta W_x) \quad (8)$$

ここで $SARM(g\ C\ (g\ C)^{-1}\ d^{-1})$ と $SARG(g\ C\ (g\ C)^{-1})$ はそれぞれ単位バイオマスあたりの維持呼吸速度・成長呼吸係数であり、 ΔW はバイオマス成長速度である (ARG は $\Delta W > 0$ の場合のみ計算)。

2.4 NPP データベース

実測値との比較検証には、米国 Oak Ridge 研究所が作成し公開している陸上生物圏のデータベースを利用した。世界 6,000 件以上の *NPP* 情報が登録されているが、前処理として、① 東アジア地域に含まれるデータの抽出、② 重複分の除去、③ 単位の統一、④ 位置または植生タイプが特定できないデータの除去、⑤ 地上部または地下部のどちらかが欠測しているデータの除去、を行った。また森林については、林齢によって *NPP* が大きく

変化すると考えられるので、林齢情報が記載されているデータのみを使用した。結果的に、Table 3 に示す 612 件の *NPP* データがモデル検証に使用された (Fig. 1 参照)。

2.5 モデル推定値間の相互比較

地域スケールでモデル推定値と実測値を直接比較することは困難であり、複数のモデル間で相互比較を行うことでモデルの挙動の妥当性を検証することができる (Cramer *et al.*, 1999)。本研究では、気候要因を用いた 4 種類の経験的モデル (Miami, Montreal, Chikugo, Rosenzweig)、および人工衛星データを用いた推定モデルと Sim-CYCLE との比較を行った。ここで重要なのは、6 種類のモデル間には Fig. 3 に示すような関係があり、入力データの共通性を高めている点である。それにより、推定値間に見られた差違の原因をモデル自体に起因する部分に限定することが容易になる。加えて、分解能の向上が推定結果に与える影響を明確化するため、以前の研究 (Ito, 2001) で低分解能の格子間隔で Sim-CYCLE を実行した結果とも比較を行った。

Miami モデル (Lieth, 1975) は代表的な気候変数との回帰関係を使用する経験モデルである。NCEP/NCAR 再解析データに基づく年平均気温と年間降水量から *NPP* を計算することができる。Montreal モデル (Lieth, 1975) も同様な経験モデルであるが、独立変数に年間の実蒸発散量を用いている。Rosenzweig モデル (Rosenzweig, 1968) も実蒸発散量に対する経験モデル

であるが、地上部の生産力 ($ANPP$) を与える点が異なっている。Chikugo モデル (Uchijima and Seino, 1985) は、純放射量と放射乾燥度に対する NPP の経験モデルである。ここで用いた純放射量は Sim-CYCLE

Table 3. Summary of observation NPP data for model validation (from the NPP database of the Oak Ridge National Laboratory).

Source	Data number		
	Forests	Grass lands	Crop lands
International Biological Programme (IBP) (DeAngelis <i>et al.</i> , 1997)	5	0	0
National Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS) (Gower <i>et al.</i> , 2001)	5	0	0
Global Primary Production Data Initiative (GPPDI) (Zheng <i>et al.</i> , 2003)	0	4	0
Ni <i>et al.</i> (2001)	574	0	0
Esser (1998)	0	18	2
Denissenko <i>et al.</i> (2001)	0	4	0
Total	584	26	2

の放射収支モジュールによる出力値である (Fig. 3)。

衛星データに基づく NPP 推定には、キャノピーで吸収された光合成有効放射量から乾物生産量への変換モデルを用いた (Ruimy *et al.*, 1994)。ここでは、米国 Goddard Space Flight Center が配布している全球 8 km メッシュの NOAA/AVHRR データによる正規化差植生指数 (NDVI) を使用した (1982~2000 年分を月別に平均)。そこで、Sellers *et al.* (1992) による経験式を用いて、キャノピーにおける光合成有効放射の吸収率 ($fAPAR$) を算出した。一方、乾物重への変換係数 (ϵ) は、森林・草原・耕作地の間で異なる値を設定し ($0.2 \sim 0.6 \text{ g C MJ}^{-1}$)、各格子点で面積加重して代表値を求めた。

低分解能なモデルの計算結果として、Olson *et al.* (1983) の 30' メッシュ現存植生マップに基づく全球モデル (Ito, 2001) を比較対象とした。ここでは気象と地形データは、高分解能モデルと共通のデータを使用しているため、土地被覆の景域レベルの不均質性に基づく差違を見ることができる。

Fig. 3. Schematic diagram of the validation process, in which Sim-CYCLE is compared with empirical models and remote-sensing models. These models share the input data and submodules of energy and water budget.

3. 結果および考察

3.1 東アジア地域の平均的炭素動態

東アジア地域 ($10.4 \times 10^6 \text{ km}^2$) を対象として各格子点において Sim-CYCLE による繰り返し計算を行い、年間の炭素収支が均衡する定常状態を求めた (Table 4)。そこでは炭素貯留量は、植物バイオマス中に 38.3 Pg C、土壌有機物中に 144.4 Pg C で安定していた (1 Pg = 10^{15} g)。年間の炭素動態として、*GPP* は 10.1 Pg C、*AR* は 5.0 Pg C、すなわち *NPP* は 5.06 Pg C と推定された。全世界の陸上生態系による年間 *NPP* の推定値 (50 Pg C; Cramer *et al.*, 1999) に基づくと、東アジアの寄与分は 10% 程度と推測される。これは、氷床を除いた陸地面積比から妥当な結果であるといえる。また *NPP* のうち、地下部 (*BNPP*) による寄与率は 30.4% であった。Fig. 4a は年間 *NPP* の分布を示しており、高い生産力を示す中国南部から、内陸の乾燥地域や亜寒林への低下傾向が明瞭に見て取れる。

Table 4 には水収支と放射収支の合計値も示されている。それを用いて東アジア地域全体の植生による乾物生産の水利用効率 (*WUR*) と放射利用効率 (*RUE*) が計算された (Table 4)。乾物の平均的な熱量 (0.0433 MJ g^{-1} 乾重) を用いると、日射エネルギーの固定率が計算

される。つまり、上記の *NPP* は 0.221 ZJ ($1 \text{ ZJ} = 10^{15} \text{ MJ}$) のエネルギーに相当し、入射する太陽エネルギーの固定率は平均して 0.32% と推定された。

3.2 季節変化

モンスーンの影響を受ける東アジア地域では、陸上植生の機能的側面には明瞭な季節変化が生じていた。月間 *NPP* は 1 月に 0.06 Pg C と最低になり、7 月に 1.01 Pg C で最大値を示していた。換言すれば、6~8 月の夏季に年間の 55% に相当する乾物生産が集中していた。*GPP* に対する *NPP* の比率は、年平均値 50.3% に対し、1 月の 38.0% から 8 月の 53.0% まで変化していた。これは、生産力の低下する冬季には、非同化器官による呼吸消費の相対的比重が大きくなるためと推察された。*NPP* の変化に伴い、*WUR* や *RUE* も概して夏季に上昇し、冬季に低下する傾向が見られた。土壌生物の従属栄養的呼吸を加味した純生態系生産量にも明確な季節変化が見られ、5~9 月には 0.83 Pg C の炭素を正味で吸収し、10~4 月に同量を放出していた。これは、北半球の大気 CO_2 に見られる夏季の濃度低下に対し、東アジア地域がある程度の寄与を行っていることを示唆している (冬季は呼吸放出で逆に濃度上昇させる)。このように、植生機能の季節変化を解析できる点は、年間値を扱う経験的モデルに対する利点である。

Table 4. Summary of the estimated water and radiation budget, productivity, and production efficiency in East Asia.

Items	Average	Total East Asia
<i>Water budget</i>		
<i>P</i> precipitation	($\text{kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	($\text{Eg H}_2\text{O yr}^{-1}$)*
<i>AET</i> actual evapotranspiration	923	9.64
<i>TRN</i> transpiration	457	4.77
	315	3.29
<i>Radiation budget</i>		
<i>S</i> downward shortwave radiation	($\text{MJ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	(ZJ yr^{-1})*
<i>R_n</i> net radiation	6,567	68.5
<i>APAR</i> absorbed photosynthetically active radiation	2,679	28.0
	1,712	17.9
<i>Productivity</i>		
<i>GPP</i> gross primary production	($\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	(Pg C yr^{-1})*
<i>NPP</i> net primary production	967	10.1
<i>ANPP</i> aboveground <i>NPP</i>	485	5.06
<i>BNPP</i> belowground <i>NPP</i>	337	3.52
	147	1.54
<i>Water use efficiency</i>		
<i>WUE_P</i> (= <i>NPP/P</i>)		($\text{g C (kg H}_2\text{O)}^{-1}$)
<i>WUE_{AET}</i> (= <i>NPP/AET</i>)		0.52
<i>WUE_{TRN}</i> (= <i>NPP/TRN</i>)		1.06
		1.54
<i>Radiation use efficiency</i>		
<i>RUE_S</i> (= <i>NPP/S</i>)		(g C MJ^{-1})
<i>RUE_{Rn}</i> (= <i>NPP/R_n</i>)		0.074
<i>RUE_{APAR}</i> (= <i>NPP/APAR</i>)		0.18
		0.28

* P (peta) = 10^{15} , E (exa) = 10^{18} , Z (zetta) = 10^{21} .

Fig. 4. Estimated net primary productivity (NPP) in East Asia. (a) Sim-CYCLE with a mesh-size of 5 min. A steady state of the carbon budget with an actual vegetation map is shown. NPP by empirical models: (b) Miami model, (c) Chikugo model, and (d) Montreal model. (e) Aboveground NPP by Rosenzweig model. (f) NPP derived from remote sensing NDVI data. (g) NPP by Sim-CYCLE, but with a mesh-size of 30 min.

Fig. 5. Estimated average *NPP* for 46 biome types. See Table 1 for biome names. (a) By Sim-CYCLE, with standard deviation bars, and (b) by the 4 empirical models.

3.3 植生タイプ間変異

次に植生タイプごとに集計して比較を行った (Fig. 5)。年間 *NPP* は山岳性砂漠 [37] の $0.0 \pm 2.5 \text{ g C m}^{-2}$ から灌漑草地 [26] の $1,016 \pm 108 \text{ g C m}^{-2}$ の範囲で顕著な差が見られた ([] 内の番号は Table 1 参照)。地域全体の *NPP* に対する寄与率が高かったのは水田 [1] (15.3%), 都市域の耕作地 [7] (9.9%), 冷涼混交林 [5] (7.7%) などであったが、高い耕作強度を反映して、領域合計 *NPP* に対する耕作地の寄与は 34.5% に達していた。一方、単位面積あたりでは森林生態系が概して $500 \sim 800 \text{ g C m}^{-2}$ の高い値を示した。*GPP* に対する *NPP* の比率は、草原 (60% 程度) よりも森林で低い (45% 程度) 傾向が見られた。これは従来の実測データと同じ傾向であるが、定常状態を扱ったため、植生タイプ間の差違がやや過小評価されていると考えられる。年間実蒸発散量 (*AET*) は、半砂漠低木林 [9] における

$213 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2}$ から、水田 [1] の $1,017 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2}$ まで差が見られた。蒸散量ベースの水利用効率 (WUE_{TRN}) は半砂漠 [9] ($3.13 \text{ g C (kg H}_2\text{O)}^{-1}$) や寒地草原 [10] (2.96) で高く、混交林 [11] (1.27) など湿潤な森林で低い傾向が見られた。一方、年間光合成有効放射吸収量 (*APAR*) は、常緑性低木林 [19] や混交林 [11] で大きく ($2.4 \text{ GJ (=} 10^3 \text{ MJ) m}^{-2}$)、落葉針葉樹林 [3] などが小さい値 (1.0) を示した。*APAR* ベースの放射利用効率は灌漑草地 [26] で最も高く (0.41 g C MJ^{-1})、極域・山岳砂漠 [37] で最も低かった (0.10)。

3.4 他の手法による推定値との比較

3種類の経験的モデル (Miami, Montreal, Chikugo) から推定された東アジア地域の潜在年間 *NPP* は、それぞれ 4.6, 4.7, 5.1 Pg C であった。過去に行われた全球 *NPP* モデルに関する相互比較研究 (Cramer *et al.*,

Table 5. Correlation coefficients (r^2) among model estimations of 5-minute resolution *NPP* mapping for East Asia ($n=180,596$).

	Sim-CYCLE	Miami	Montreal	Chikugo	NDVI-ε
Sim-CYCLE	1.000	0.734	0.735	0.617	0.402
Miami		1.000	0.795	0.608	0.406
Montreal			1.000	0.644	0.507
Chikugo				1.000	0.588
NDVI-ε					1.000

1999) では、推定結果間に $\pm 20\%$ 程度の変動が生じており、それと比較すると、ここに挙げた東アジアの*NPP*推定間のばらつき程度は小さいと見なせる。実際に、植生タイプごとの集計値 (Fig. 5) で比較すると、生産力の高低の傾向は概して適合していることが分かる。Sim-CYCLE と経験的モデルは格子点ごとの回帰分析でも良い相関を示した ($r^2=0.617\sim 0.735$) (Table 5)。しかし *NPP* マップ (Fig. 4) では、東アジアの北部・内陸部の低生産力域は共通して推定されている反面、中国南部の高生産力域の有無および分布には大きな差が存在している。なお、Sim-CYCLE では日本国内の *NPP* は 0.24 Pg C (520 Mt 乾重) と推定されており、Uchijima and Seino (1985) が示した Chikugo モデルによる推定値 380 Mt 乾重より 37% 大きく評価されていた。

実測された *NPP* と、対応する地点におけるモデルの推定結果は概して良い相関を示していた (Fig. 6, $r^2=0.80$)。このことは、Sim-CYCLE が東アジア陸域植生の生産力を良い精度で推定できていることを示唆している。しかし、詳しく見ると系統的問題も見られた。例えば、モデルは $1,500 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ を超えるような高い *NPP* を表現できていない。そのため、実測値と推定値間の回帰直線の傾きは 1 を下回っていた。モデルはある程度の広がりにおける平均的状态を推定することはできて、極端な局所生産力を表現するには適さない可能性がある。

衛星データに基づく *fAPAR* を用いた場合、年間 *NPP* は $5.18 \text{ Pg C yr}^{-1}$ と推定された (Fig. 4f)。その季節変化は、吸収放射量から乾物量への変換係数が通年一定と仮定されているにもかかわらず、Sim-CYCLE の推定結果と非常によく一致していた (Fig. 7)。一方で、吸収された光合成有効放射 (*APAR*) の合計値 (11.6 ZJ yr^{-1}) は Sim-CYCLE のものより低い点や、格子点ごとの相関係数は他の経験モデルよりも低い点には注意を要する (Table 5)。このような差違の原因の一つは、Sim-CYCLE と経験モデルが全て炭素循環の定常状態を想定しているのに対し、衛星観測は非定常な現実状態を反映している点にあると考えられる。

Fig. 6. Comparison of *NPP* between observation and model estimation in East Asia. Note that both observation and model estimation were at the same stand age, in case of forest sites.

Fig. 7. Seasonal variation in the estimated *NPPs* by Sim-CYCLE and remote sensing model (based on NDVI).

3.5 高分解能化の意義

空間分解能 30' の計算では領域全体の年間 *NPP* は 5.3 Pg C であり、5' メッシュ計算 (5.1 Pg C) よりやや大きかった。Fig. 4g に示された空間分布から、中国内陸部から北部にかけての生産力域が他のモデルより過大評価されている点や、華南地方で不自然なモザイクが生じている点を読みとれる。実際に 30' メッシュでは、島嶼を含む沿岸域における推定は明らかに困難であり、山岳荒原における低生産力地域の出現を表現できていなかった。1 個の 30' メッシュ内に含まれる 36 個の 5' メッシュの間の変動係数は 23.4% に達していた (標準偏差 $\pm 59.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)。また、30' メッシュごと ($n=5,022$) に集計した推定値間の相関係数 (r^2) は 0.52 に止まっていた。

つまり、30' メッシュでは単一の優占タイプで代表させていたために耕作地と自然植生の混在を精度良く扱うことが難しかったが、レイヤー化した 5' メッシュの計算を行うことで、中国南部や日本の低地のように耕作強度が高い地域と自然植生との漸移を扱うことが可能となった。さらには、東京や大阪など植生に乏しい都市域における低生産力域の出現も再現されていた。本研究では、格子間隔の細分化と併せて格子内のレイヤー化も実施したが、5' メッシュの格子内には平均して 3.5 タイプの植生が出現していた。全体の 79.4% のメッシュでは、最大の面積を占める植生タイプが格子面積の 50% 以上を被覆していた (つまり代表的であった)。結果的に、高分解能化とレイヤー化により計算量は約 125 倍に増加したが、モデルの簡略化などのトレードオフを行う必要がないため、詳細化による精度の向上が直に表れると期待される。

4. 結 語

本研究では、東アジア地域を対象にプロセスベースの炭素循環モデルを適用し、5' メッシュという高い空間分解能で *NPP* を推定した。これまで、広域的 *NPP* の推定は経験モデルや衛星データを用いて行われていたが (例えば Ohta *et al.*, 1993; Esser, 1995; Hicke *et al.*, 2002; Matsushita and Tamura, 2002), ここではプロセスベースのモデルを用いることで、季節変化や炭素貯留量を始めとした生態系機能の諸局面について解析を行うことが可能となった。これはモデルの多面的な検証や将来予測への応用を行う上で有効であり、入力データ数や計算量の増大という負担を補うに足る利点だと考えられる。特に、土壌を含めた生態系の正味炭素収支を計算できるのは、グローバル炭素循環を含めた地球環境における陸域生態系の役割を考察する上で極めて重要である

と考えられる。

しかし、ここで行った高分解能マッピングにも方法論的限界があり、より一層の研究が求められる。例えば、局所的な攪乱現象 (森林火災など) を含む推定には、微小スケールのモデルを利用したパラメタリゼーションをさらに加える必要がある。また、衛星データや統計データに基づいて、土地利用の時間変化を考慮しないと現実の炭素収支変動を評価することは難しい。モデルの検証も重要な問題であり、本研究で行った既存の生産力データおよびモデルとの比較に加え、微気象学的フラックス観測による CO_2 収支との比較などを行うことでより確実性を高める必要がある。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金 (13308027) を用いて行われた。多数の有益なコメントを下された査読者および編集委員に深く感謝申し上げる。

References

- Cramer, W., Kicklighter, D.W., Bondeau, A., Moore, B.I., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A., Schloss, A.L. and Potsdam *NPP* model inter-comparison participants, 1999: Comparing global *NPP* models of terrestrial net primary productivity (*NPP*): overview and key results. *Global Change Biol.*, 5, 1-15.
- DeAngelis, D.L., Gardner, R.H. and Shugart, H. H., 1997: *NPP Multi-Biome: Global IBP Woodlands Data, 1955-1975*. Available on-line [http://www.daac.ornl.gov/] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge.
- Denissenko, E.A., Brovkin, V. and Cramer, W., 2001: *NPP Multi-Biome: PIK Data for Northern Eurasia, 1940-1988 (Based on Bazilevich)*. Available on-line [http://www.daac.ornl.gov/] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge.
- Esser, G., 1995: Contribution of Monsoon Asia to the carbon budget of the biosphere, past and future. *Vegetatio*, 121, 175-188.
- Esser, G., 1998 : *NPP Multi-Biome : Global Osnabrück Data, 1937-1981*. Available on-line [http://www.daac.ornl.gov/] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge.
- Gower, S.T., Krankina, O., Olson, R.J., Apps, M., Linder, S. and Wang, C., 2001: Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecol. Appl.*, 11, 1395-1411.
- Hicke, J.A., Asner, G.P., Randerson, J.T., Tucker, C., Los, S., Birdsey, R., Jenkins, J.C. and Field,

- C., 2002: Trend in North American net primary productivity derived from satellite observations, 1982–1998. *Global Biogeochem. Cycles*, **16**, 2.1–2.14. 10.1029/2001GB001550.
- IGBP-DIS 2000: *Global Soil Data Products CD-ROM*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- Ito, A., 2001: A broad-scale simulation of transitional change in the carbon dynamics of boreal and arctic land ecosystems along with environmental gradients. *Bull. Res. Center North Eurasia North Pacific Reg., Hokkaido Univ.*, **1**, 67–82.
- Ito, A. and Oikawa, T., 2002: A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecol. Model.*, **151**, 147–179.
- 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, Berlin, pp. 237–263.
- Loveland, T. R. and Belward, A. S., 1997: The IGBP-DIS global 1 km land cover data set, DISCover: first results. *Int. J. Remote Sens.*, **18**, 3289–3295.
- Matsushita, B. and Tamura, M., 2002: Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sens. Environ.*, **81**, 58–66.
- Monsi, M. and Saeki, T., 1953: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.*, **14**, 22–52.
- NGDC (National Geophysical Data Center) 1983: *ETOPO-5 Elevation Data*. NGDC, Boulder.
- Ni, J., Zhang, X. S. and Scurlock, J. M. O., 2001: *NPP Multi-Biome: Chinese Forests Data, 1989–1994*. Available on-line [http://www.daac.ornl.gov/] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge.
- Ohta, S., Uchijima, Z. and Oshima, Y., 1993: Probable effects of CO₂-induced climatic changes on net primary production of terrestrial vegetation in East Asia. *Ecol. Res.*, **8**, 199–213.
- Olson, J. S., Watts, J. A. and Allison, L. J., 1983: *Carbon in live vegetation of major world ecosystems*. ORNL-5862, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- Rosenzweig, M., 1968: Net primary productivity of terrestrial environments: predictions from climatological data. *Am. Nat.*, **102**, 67–74.
- Roy, J., Saugier, B. and Mooney, H. A. (eds.), 2001: *Terrestrial global productivity*. Academic Press, San Diego, 573 pp.
- Ruimy, A., Saugier, B. and Dedieu, G., 1994: Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *J. Geophys. Res.*, **99**, 5263–5283.
- Sellers, P. J., Berry, J. A., Collatz, G. J., Field, C. B. and Hall, F. G., 1992: Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.*, **42**, 187–216.
- Shibata, K. and Uchijima, Z., 1987: *The distribution and measurement of solar energy*. Gakkai Shuppan Center, Tokyo, 189 pp. (柴田和雄・内嶋善兵衛, 1987: 太陽エネルギーの分布と測定. 学会出版センター, 東京, 189 pp.).
- 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**, 353–352.
- Zheng, D. L., Prince, S. D. and Wright, R., 2003: Terrestrial net primary production estimates for 0.5 degree grid cells from field observations — a contribution to global biogeochemical modelling. *Global Change Biol.*, **9**, 46–64.