

# ADEOS-II/GLI データを用いた 全球植生純一次生産量の推定における 二方向性反射率の影響評価

陳 璐

(奈良女子大学・人間文化研究科)

古 海 忍

(奈良佐保短期大学)

村 松 加奈子

(奈良女子大学・共生科学研究センター)

本 多 嘉 明・梶 原 康 司

(千葉大学・環境リモートセンシング研究センター)

醍 醐 元 正

(同志社大学経済学部)

## Abstract

The total global terrestrial NPP (Net Primary Production) distribution in 2003 was estimated from MVIUPD (modified vegetation index based on universal pattern decomposition) by using the 16 day composite data of ADEOS-II/GLI L2 ACLC (Ver. 210: atmospheric corrected). However, for the global observing, GLI sensor had a large field of view as 45. So as to make the system error of global NPP estimation by using GLI data clear, there is a need to take bi-directional reflectance distribution function (BRDF) effect into account. For different geometric shapes and scattering properties of various canopies, the BRDF effects on NPP estimation are different corresponding to the type of vegetation. Bi-directional reflectance factor (BRF) observations were held by radio-controlled helicopter on four vegetation types to make respective BRDF effect clearly. Moreover, with the use of Ross-Li-R BRDF model, the BRDF effects of various targets on NPP estimation were simulated under the GLI observing conditions. Ultimately, from the simulated results and the data of global land cover classification, the error of total global NPP estimation from the BRDF effect was estimated as from  $-2.4$  to  $6.7$  PgC/yr.

## 1 はじめに

近年、地球温暖化を把握するために、大気中の二酸化炭素を植生が光合成によって固定する能力を評価する植生純一次生産量 (net primary production, NPP) に関する研究が多く行われている。特にリモートセンシング技術の発展で、広範囲、短期高頻度の衛星データから全球 NPP

を求めることが実現されてきている。その中で、植生指標 MVIUPD (Modified Vegetation Index based on Universal Pattern Decomposition) から、総光合成量推定アルゴリズムを用いた人工衛星 ADEOS-II/GLI データより 2003 年全球 NPP を推定した<sup>1)</sup>。しかしながら、衛星データ解析において地表面物質、陸域はしばしば等方散乱体として扱われるが、実際に観測対象が等方散乱体でないことが報告されている。また、全球観測ではセンサーの観測角度の変化が大きく、太陽高度が季節変化し、衛星から植生を高精度に観測する際、太陽・センサーと植生がなす角度が、衛星データに及ぼす二方向性反射 BRDF (bi-directional reflectance function) の影響が注目されている。衛星データから推定した純一次生産量の更なら精度の向上が望まれているために、その影響に関する考察を行う必要がある。BRDF の影響が地表面に分布する植生の形状、密度などに依存するので、異なる植生の NPP 推定に対する BRDF の影響を調べる必要がある。そのため、本研究では、二方向性反射率データを得ることを目的として、様々な植生に対して、地上で無人ヘリコプターにより多観測角度で分光反射率の BRF (bi-directional reflectance factor) 観測を行った。Ross-Li-R BRDF モデルを利用した上で、GLI センサーの可能な観測条件において、実測したデータから各対象地域の二方向性反射率データをシミュレーションすることができた。これらのデータから各対象地域の NPP 推定における BRDF の影響を評価することができた。最終的に、全球分類データ及び全球陸域 NPP の分布データを合わせて、BRDF の影響により、推定した 2003 年全球 NPP の系統誤差を明らかにする。

## 2 解析手法

### 2.1 BRDF モデル

BRDF の影響を評価する際に、BRDF モデルが必要だと考えられる。本研究では半経験式の一つであり、次式で表される Ross-Li-R BRDF モデル<sup>1)</sup>を用いる。

$$R(\theta, \vartheta, \phi) = f_{iso} + f_{vol}K_{vol}(\theta, \vartheta, \phi) + f_{geo}K_{geo}(\theta, \vartheta, \phi), \quad (1)$$

ここで、 $R(\theta, \vartheta, \phi)$  は二方向性反射率で、 $\theta, \vartheta, \phi$  はそれぞれ太陽天頂角、観測天頂角、太陽とセンサーとの相対方位角を表している。 $f_x$  はモデルのパラメータであり、地表面の種類と波長帯に依存する。 $f_{vol}$  と  $f_{geo}$  は体積的散乱と幾何的散乱の成分で、 $f_{iso}$  は等方散乱の反射率に相当する。つまり、 $f_{iso}$  は BRDF 影響を除いた反射率と考えられる。 $K_{vol}$  と  $K_{geo}$  は入射と反射の方向角などの幾何位置のみによって計算でき、体積的散乱と幾何的散乱のカーネルである。このモデルでは比較的単純な形で計算処理が行え、様々な種類の植生に対して応用できる。

### 2.2 NPP の推定手法

NPP の推定手法<sup>2)</sup>では地上測定データに基づき植物光合成及び植生被覆率の両者の線形関係を満たすような植生指標 MVIUPD<sup>2)</sup> (或は VIPD)<sup>3)</sup> を使用して、光飽和を考慮した総光合成量推

定モデルである。植生純一次生産量(Net Primary Productivity: NPP)は総生産量(Gross Primary Productivity: GPP)より呼吸の損失量  $R_p$  を差し引いて求められる。

$$NPP = \text{総生産量}(GPP) - \text{呼吸量}(R_p) \quad (2)$$

上式の総生産量 GPP はある期間総光合成量 (gross photosynthesis) を積分することにより推定できる。

$$GPP = \int P(\text{PAR}(t), \text{MVIUPD}(t)) dt \quad (3)$$

また、総光合成量 ( $P(\text{PAR}(t), \text{MVIUPD}(t))$ ) は下式のように 光合成有効放射量 (Photosynthetically Active Radiation: PAR) 及び植生指標 MVIUPD の関数である。

$$P(\text{PAR}(t), \text{MVIUPD}(t)) \simeq \frac{\text{MVIUPD}(t)}{\text{MVIUPD}_{std}} \times \text{Pstd}(\text{PAR}(t)). \quad (4)$$

$\text{Pstd}(\text{PAR}(t))$  は下式で示す光・光合成曲線である。

$$\text{Pstd}(\text{PAR}(t)) = \frac{0.52 \times 0.028 \times \text{PAR}(t)}{1 + 0.028 \times \text{PAR}(t)}, \quad (5)$$

ここで全天日射量の48%が光合成有効放射量 PAR と見なす。植生指標 MVIUPD は以下の通りに定義する：

$$\text{MVIUPD} = \frac{uC_v - uC_w - 0.2 \times uC_s - uC_4}{uC_w + uC_v + uC_s}, \quad (6)$$

上式の ( $uC_w + uC_v + uC_s$ ) は不変パターン展開法<sup>4</sup>での各基本パターンとなる水、植生、土壤の反射率の総和を表す。雪などでおおわれ植物を欠く領域に対して、植生指標 MVIUPD は負の値になる。また、植生指標 VIPD は以下の通りに定義する：

$$\text{VIPD} = \frac{C_v - C_s - C_w \cdot \frac{S_s}{\sum_{i=1}^n A_i} + S_s}{S_v + S_s}, \quad (7)$$

上式の  $C_v, C_s, C_w$  はそれぞれパターン展開法<sup>5,6,7</sup>での水、植生、土壤のパターン展開係数である。 $S_v, S_s$  は植生と土壤の基本パターンの反射率の和であり、定数である。

式(3)の  $\text{MVIUPD}_{std}$  は地上実測反射率データより算出し定数 0.77 である。VIPD を使う場合で、 $\text{VIPD}_{std}$  は定数 0.56 である。呼吸量  $R_p$  は以下の経験式<sup>8</sup>より求められる。T は気温 [°C] である。

$$R_p = \frac{7.825 + 1.145 \times T [^\circ\text{C}]}{100} \times GPP. \quad (8)$$

### 3 BRF 観測及び観測対象地域

BRF 観測は地上でセンサーが載せられた無人ヘリコプターで Fig. 1 のように行われた。つまり、センサーが太陽と同じ平面 (Principal Plane) 及び垂直平面 (Perpendicular Plane) で、観測角度が変えながら、各平面で約 17 回で対象地域の分光反射率を測定した。BRF 観測の観測天頂角度は -60 から 60 度まで、5 度か 10 度ずつ変わった。センサーの観測波長範囲は 520-

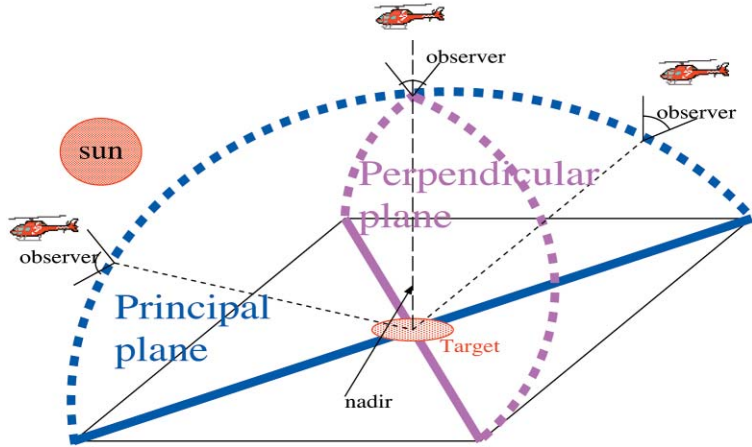


Figure 1 Various observation instruments loaded with the radio-controlled helicopter.

スギ林 ↓



ベイマツ林 A ↓



ベイマツ林 B ↓



広葉樹林 ↓



草地 ↓



水田 ↓



Figure 2 The photos of various targets, including Japanese cedar, Douglas fir, broadleaf forests, grassland and paddy, taken at some observation points during BRF observations.

**Table 1 Information of six vegetation targets in BRF observations**

対象地域		中心位置	主な樹種及び特徴
針葉	スギ林	34.343°N, 136.024°E	スギ：ヒノキ（7：3）
樹	バイマツ林 A	48.615°N, 123.724°W	カラマツ，樹高約 30 m
林	バイマツ林 B	48.616°N, 123.723°W	カラマツ，樹高約 5 m
広葉樹林		32.822°N, 114.488°W	調査中
草地		32.844°N, 114.444°W	乾燥草地
水田		34.723°N, 135.809°E	

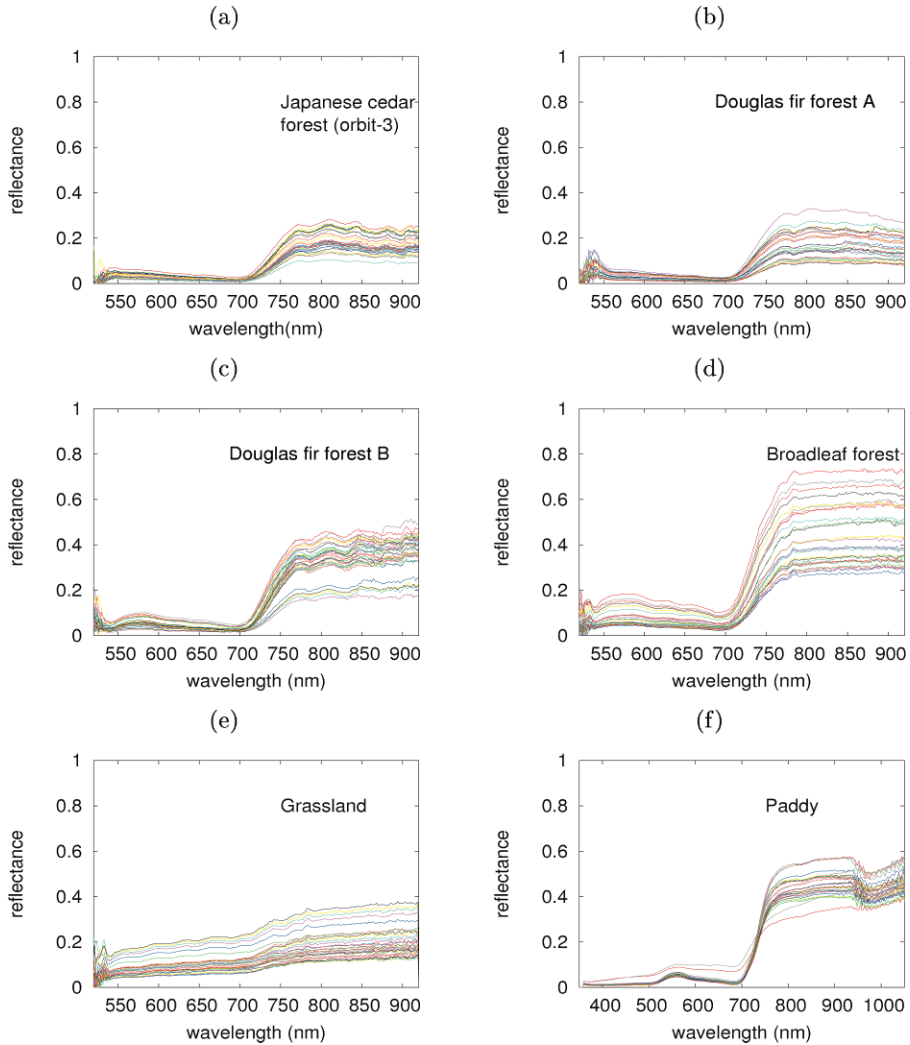
920 nm であり，その波長帯に含まれる ADEOS-II/GLI の 5 つバンド（中心波長：545, 678, 710, 763, 865 nm）を解析用のバンドとする。

本研究での BRF 観測の対象地域は三つ針葉樹林（スギ林と林齢が違う二つバイマツ林を含む），広葉樹林，草地，水田を含む六つ異なる植生域。各対象地域に関する詳しい情報は Table 1 に示す。また，Fig. 2 に各対象地域の BRF 観測にある観測ポイントでの写真を示す。

## 4 解析結果及び検討

### 4.1 各対象地域における BRDF 影響の特徴について

異なる植生ではそれぞれ BRDF の影響に関する考察を行った。Fig. 3 に各対象地域に対して，BRF 観測での各観測ポイントで実測された分光反射率を示す。各植生域にはそれなりの反射率の特性を表す。植生種類と波長によって，反射率の変化傾向が違う。つまり，受けるの BRDF 影響が違うことが明らかとなった。その差異を明瞭するために，Fig. 4 には最も BRDF 影響を受けやすい principal 平面で観測天頂角度と反射率の関係を示す。ここでは，太陽が観測センサーの背面である場合の観測天頂角度がプラスと定義し，正面である場合はマイナスと定義した。全体的に，水田（Fig. 4 の f）以外の対象地域で後方散乱（観測天頂角度が+）の反射が強い。広葉樹林（Fig. 4 の d）には近赤外域で前方散乱（観測天頂角度が-）がやや強くて，後方散乱での反射率変化がもっと大きい。同じ科目の針葉樹林であるスギ林（Fig. 4 の a）とバイマツ林（Fig. 4 の b, c）の反射率の変化傾向に関して，他科目と比べると，可視域で反射率の変化が小さくて，近赤外域でその変化が顕著である特徴が共通ですが，樹種，林齢，密度などの差異で，それぞれ反射率の変化には多少違いがある。また，草地（Fig. 4 の e）には，土壌の反射特性を反映して，各波長での反射率の変動傾向がほぼ同じである。水田（Fig. 4 の f）に対して，観測角度の違いにより，近赤外域以外の反射率の変化がほとんどない。



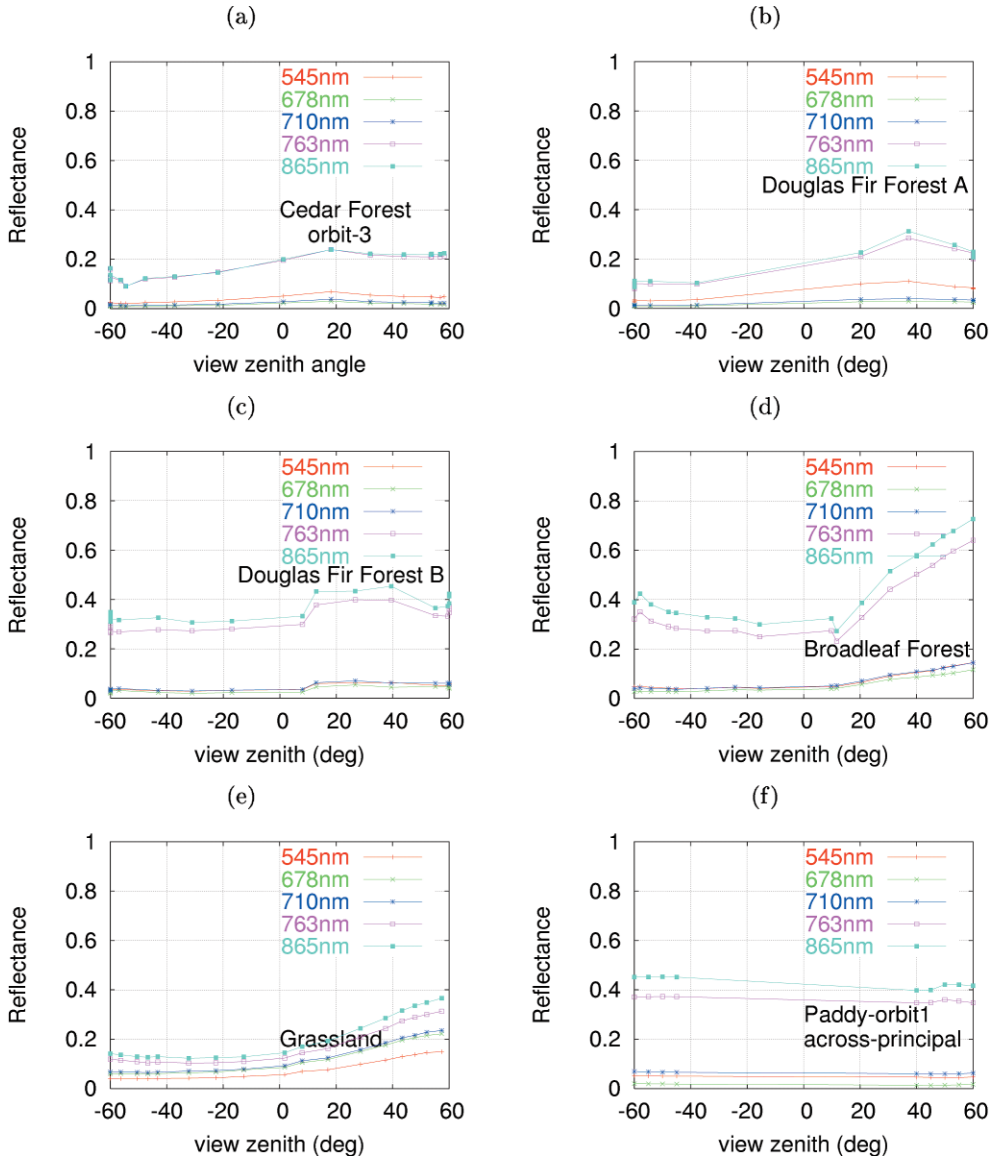
**Figure 3** The spectra in BRDF observations for cedar forest (a), pine forest A (b), pine forest B (c), broadleaf forest (d), grassland (e), and paddy (f). Wavelength of the spectra is from 520 to 920 nm except for paddy with the wavelength range of 350–1050 nm.

## 4.2 各対象地域の NPP 推定における BRDF の影響

NPP の推定における BRDF の影響を調べるために、緯度、季節、時間によって太陽の位置が変わるので、様々な GLI 観測状況での BRDF データが必要である。そのため、実測した反射率データと各観測ポイントのセンサーと太陽の幾何位置から、Ross-Li-R BRDF モデルのパラメータを求めた上で、様々な GLI 観測状況での BRDF データのシミュレーションを行う。

### 4.2.1 BRDF モデルのパラメータ

Table 2 に求めた各対象地域に対する各バンドのパラメータを示す。これらのパラメータと植生幾何構造の関連性を調べるため、異なる植生域の各パラメータを比較した。その結果を Fig. 5 に示す。 $f_{iso}$  値 (Fig. 5 の a) が等方散乱の反射率に相当し、BRF 観測で実測した反射率



**Figure 4** Reflectance of targets (cedar forest (a), Douglas fir forest A (b), Douglas fir forest B (c), broadleaf forest (d), grassland (e), and paddy (f)) in BRDF observations versus view zenith angles in the solar principal plane for five corresponding GLI bands (central wavelength : 545, 678, 710, 763, 865 nm).

(特に Fig. 4 に示された観測天頂角が  $0^\circ$  際の反射率) と一致する。針葉樹林と広葉樹林の近赤外域での  $f_{vol}$  値 (Fig. 5 の c) と  $f_{geo}$  値 (Fig. 5 の b) には大きな差異がある。つまり、それぞれ与えられた体積散乱と幾何散乱の影響が違う。その原因について、密集植生である広葉樹林には葉の面積が広くて、葉の多重散乱が多くて、体積散乱が強い。逆に、疎らな植生である針葉樹林には、樹の間でギャップが大きく、かげの影響が強くて、それを表す幾何散乱が強い。草地には、波長帯によって、幾何散乱 ( $f_{geo}$ ) の影響があまり変わらない。水田には、森林と



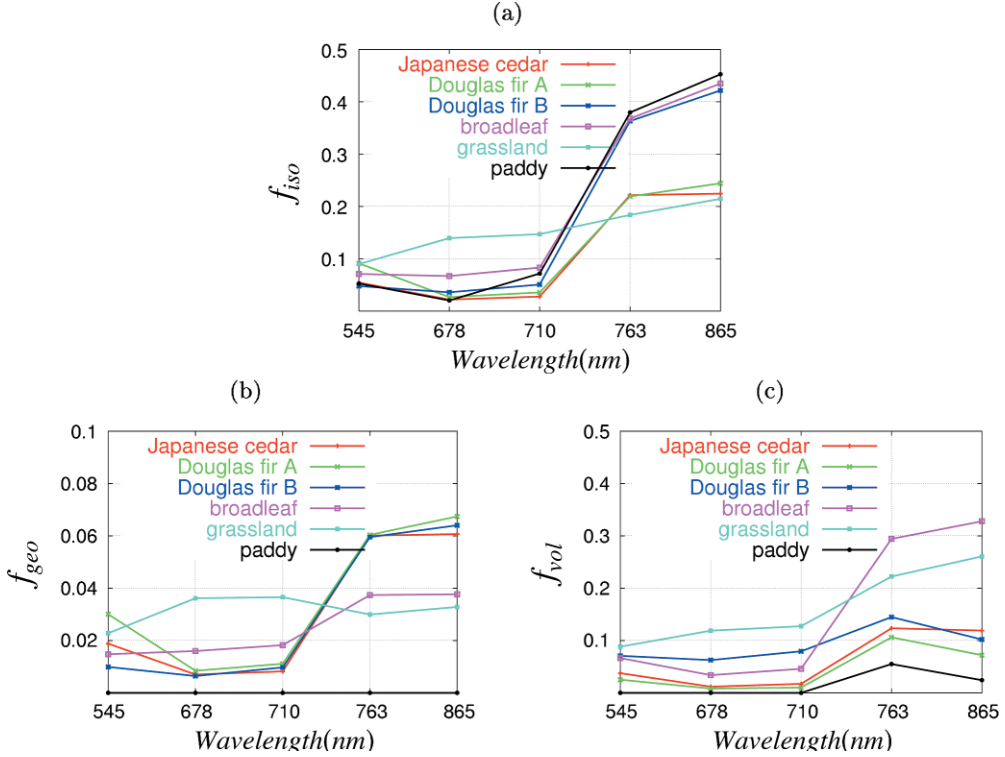


Figure 5 Isotropic scattering parameter  $f_{iso}$  (a), geometric scattering parameter  $f_{geo}$  (b) and volumetric scattering parameter  $f_{vol}$  (c) of various vegetations (cedar forest, Douglas fir forest A, Douglas fir forest B, broadleaf forest, grassland, and paddy) at five corresponding GLI bands (central wavelength : 545, 678, 710, 763, 865 nm).

Table 2 Ross-Li-R BRDF model parameters  $f_{iso}$  (top),  $f_{geo}$  (middle),  $f_{iso}$  (bottom) of different land cover types (cedar forest, Douglas fir forest A, Douglas fir forest B, broadleaf forest, grassland, and paddy) in five corresponding GLI bands (central wavelength : 545, 678, 710, 763, 865 nm), which were calculated from measured reflectance in BRDF observations.

Cover Type		$f_{iso}$				
		545 nm	678 nm	710 nm	763 nm	865 nm
針葉樹林	スギ林	0.0544	0.0220	0.0276	0.2216	0.2245
	ベイマツ林 A	0.0912	0.0267	0.0356	0.2191	0.2442
	ベイマツ林 B	0.0477	0.0358	0.0507	0.3633	0.4217
広葉樹林		0.0709	0.0669	0.0831	0.3680	0.4349
草地		0.0898	0.1394	0.1469	0.1837	0.2145
水田		0.0527	0.0202	0.0717	0.3796	0.4527
Cover Type		$f_{geo}$				
		545 nm	678 nm	710 nm	763 nm	865 nm
針葉樹林	スギ林	0.0188	0.0070	0.0082	0.0601	0.0607
	ベイマツ林 A	0.0301	0.0084	0.0111	0.0604	0.0674
	ベイマツ林 B	0.0099	0.0064	0.0097	0.0595	0.0640
広葉樹林		0.0148	0.0160	0.0182	0.0374	0.0377
草地		0.0228	0.0362	0.0365	0.0299	0.0328
水田		0	0	0	0	0



Cover Type		$f_{vol}$				
		545 nm	678 nm	710 nm	763 nm	865 nm
針葉 樹 林	スギ林	0.0376	0.0118	0.0172	0.1234	0.1191
	ベイマツ林 A	0.0251	0.0082	0.0100	0.1063	0.0719
	ベイマツ林 B	0.0707	0.0626	0.0794	0.1449	0.1019
広葉樹林		0.0663	0.0339	0.0458	0.2944	0.3279
草地		0.0882	0.1187	0.1274	0.2223	0.2607
水田		0	0	0	0.0551	0.0242

違って、並びが整って、ギャップがほぼなくて、幾何散乱の影響が見られない。体積散乱の影響も近赤外域以外は少ない。

#### 4. 2. 2 各対象地域の NPP 推定における BRDF の影響のシミュレーション

上述で求めたパラメータ (Table 2) を用いて、GLI の観測状況 (Table 3) で各対象地域の年間 BRDF データをシミュレーションした。今回の BRDF 観測での波長帯の幅が狭いため、NPP を推定する際に使う植生指標 VIPD を決定した。また、式 (3)–(5) から NPP が植生指標と線形関係であることから、NPP 推定に植生指標と同じような BRDF の影響を与えられたことが明らかとなった。そこで、各対象地域の年間 BRDF データから年間 VIPD の変化及び等方散乱の反射率に相当するパラメータ  $f_{iso}$  値 (Table 2) から VIPD を求めた。その結果は Fig. 6 に示す。Table 4 に示すように、これらの GLI 可能な観測条件での植生指標と基準にした等方散乱の際の植生指標と比較することより、植生指標 VIPD における BRDF 影響の推定を行った。その結果として、針葉樹林、広葉樹林、草地、水田に対して、BRDF の影響より各植生指標 VIPD の変化範囲は基準となった生指標 VIPD の 1.3%~17.3%、-2.0%~12.5%、-27.0%~-1.4%、-0.1%~0.1% となった。

ADEOS-II/GLI データを用いて、全球 NPP を推定する際に、GLI の多波長データにより植生の活性度などの地上情報をより多く反映した植生指標 MVIUPD を使用した。今まで BRDF 観測データから得られた各植生域の NPP 推定における BRDF 影響の結果 (Table 4) により、全球 NPP 推定におけるその影響を評価するために、植生指標 MVIUPD と VIPD の関係を調べた。Fig. 7 に、六つの BRDF 観測地に対して、GLI データから計算した二つの植生指標の関係を示す。二つの植生指標はほぼ線形な関係で、与えられた BRDF の影響も同じであることを判断した。

Table 3 The observation conditions of GLI

観測日時	観測天頂角度	観測相対方位角度
各月 15 日現地 11 時	-45°~45°	90° と 270°

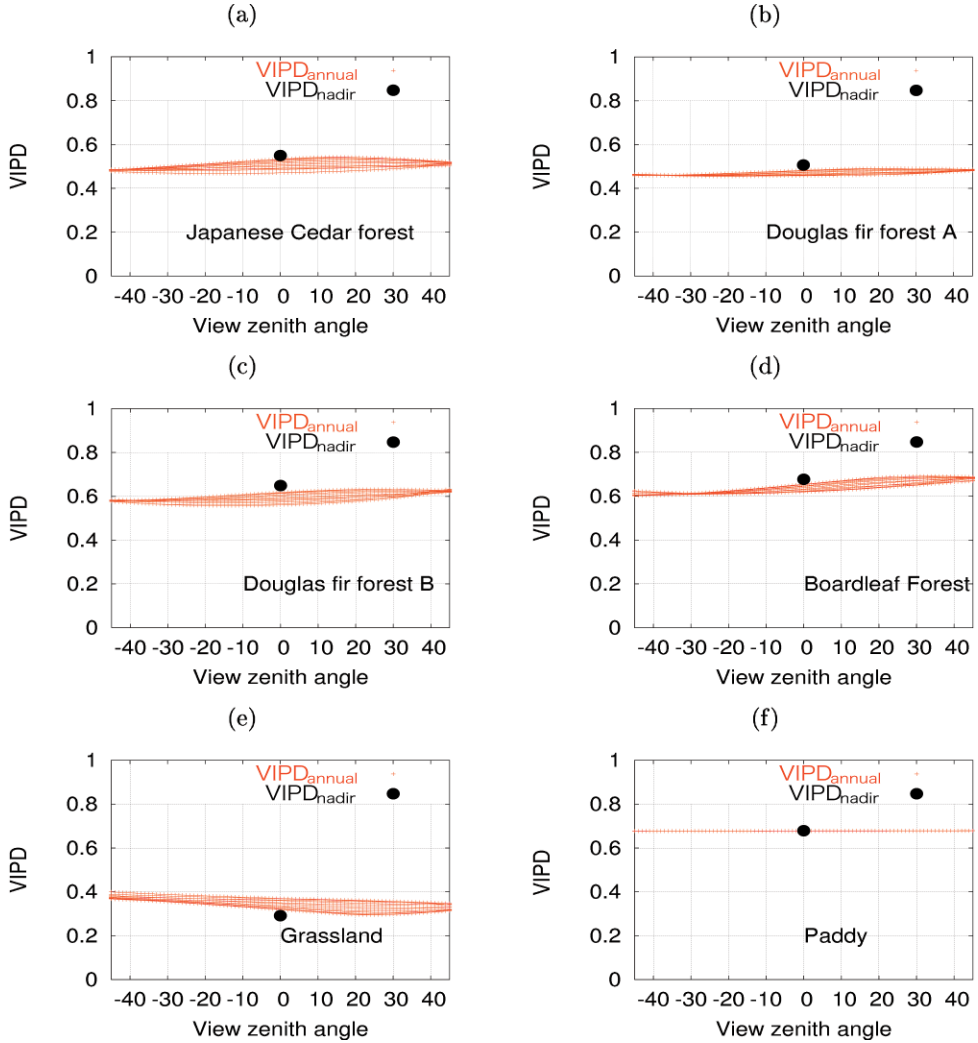


Figure 6 Simulated vegetation index VIPD in entire year under GLI observation geometries for six different vegetation covers. Nadir sun and view VIPDs ( $VIPD_{nadir}$ ) were displayed in black point, which estimated from parameter  $f_{iso}$ . The  $VIPD_{nadir}$  of cedar forest (a), Douglas fir forest A (b), Douglas fir forest B (c), broadleaf forest (d), grassland (e) and paddy (f) is 0.549, 0.506, 0.649, 0.677, 0.291 and 0.678, respectively.

Table 4 VIPDs for different vegetation covers (cedar forest, pine forest A, pine forest B, broadleaf forest, grassland, and paddy), including nadir VIPDs, maximum and minimum VIPDs at varying solar and viewing geometries. The rate means the varying range of VIPD because of the BRDF effect, comparing to the nadir VIPD.

Cover Type		$VIPD_{nadir}$	$VIPD_{max}$	$VIPD_{min}$	rate (%)
針葉樹林	スギ林	0.549	0.542	0.468	1.3~17.3
	カラマツ林 A	0.506	0.491	0.455	3.1~11.2
	カラマツ林 B	0.649	0.632	0.557	2.7~16.5
広葉樹林		0.677	0.691	0.602	-2.0~12.5
草地		0.291	0.399	0.295	-27.1~-1.4
水田		0.678	0.679	0.677	-0.1~0.1

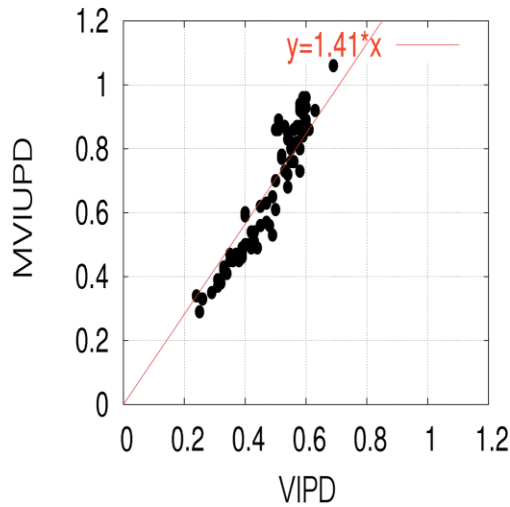


Figure 7 The relation between vegetation index *VIPD* and *MVIUPD* for four different vegetation types (cedar forest, Douglas fir forest A, Douglas fir forest B, broadleaf forest, grassland, and paddy). The data of vegetation were estimated from *GLI/L2 ACLC* data, same data as used to estimate global terrestrial *NPP* in next section.

#### 4.3 全球 *NPP* 推定における *BRDF* の影響

全球 *NPP* 推定における *BRDF* の影響を評価するため、全球 *NPP* の年間分布データが必要である。本研究で、2003年4月から10月までの *ADEOS-II/GLI* (*L2 ACLC*, ver. 210) の16日間コンポジット反射率データを用いて、植生指標 *MVIUPD* を算出した。また、4月から9月までの各月には、2シーンのコンポジットデータがあり、雲などを除去するため、月毎に *MVIUPD* の大きい方の値を使用した。さらに *GLI* データが提供されていない月(2003年1月、2月、3月、11月、および12月)について線形補完して *MVIUPD* を算出した。2003年世界の月平均日射量データは *NCEP/NCAR* (National Center for Atmospheric Research) の  $2.5^\circ$  メッシュ再解析データを用いた。世界の月平均 *PAR* データは月平均日射量より計算した。2003年の気温データは *ECMWF* (the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) より  $0.5^\circ$  メッシュ、一日の0時、6時、12時、及び18時、4時点の再解析海拔2m気温データを入手した。世界の月平均気温データはこれらのデータより平均した。光合成に対する気温条件は月平均気温が  $10^\circ\text{C}$  以上とした。*ADEOS-II/GLI* の多波長反射率データと共に光合成有効放射量 *PAR* や気温などの気象データを用いて、式(1)の通り月毎の *NPP* 値を推定した。毎月の *NPP* を積算し、北緯  $60^\circ$  から南緯  $60^\circ$  までの全球年間植生純一次生産量を推定した。その結果は *Fig. 8* に示す。また、その範囲で全球2003年年間 *NPP* の積算値は  $58.3 \text{ PgC/yr}$  となった。

全球植生の *NPP* 推定における *BRDF* の影響を評価するため、全球分類した植生項目(針葉樹林、サバナ、硬葉樹林、広葉樹林、熱帯雨林、ステップ、農地、砂漠、無樹地域)に対して、植生の形態上の特徴を基準にして、*BRDF* の影響が評価できた植生項目(針葉樹林、広葉樹林、草地、水田)に再分類した。その再分類の結果と全球植生土地被覆分類データから算出

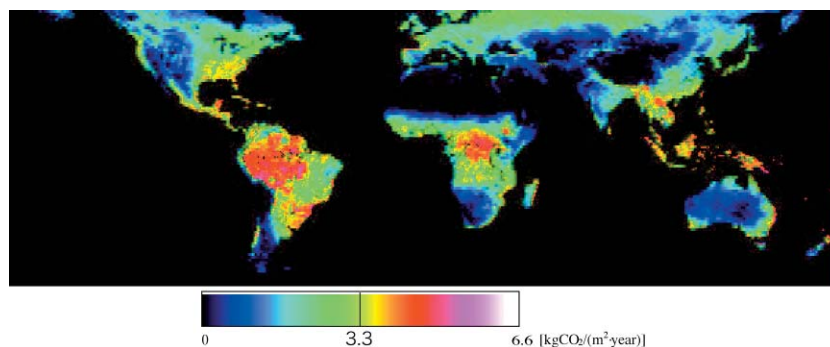


Figure 8 Global annual NPP from January to December 2003 as computed using ADEOS-II/GLI L 2 ACLC data. The upper left is (180° W, 60° N), the lower right is (180° E, 60° S). The ranges of colors from black to white represent the annual NPP are from 0 to 6.6 [kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·year)].

Table 5 Overview of BRDF effect on global NPP estimation.

Typical class	Including land cover class	Total NPP (PgC/yr)	BRDF effect on NPP	BRDF の影響による NPP の誤差 (PgC/yr)
針葉樹林	針葉樹林 サバナ, 硬葉樹林	24.0	1.3~17.3%	0.3~4.2
広葉樹林	広葉樹林, 熱帯雨林	20.8	-2.0~12.5%	-0.4~2.6
草地	ステップ	9.0	-27.1~-1.4%	-2.4~-0.1
水田	農地	3.6	-0.1~0.1%	0
その他	砂漠, 無樹地域	2.1	-	-
Total		58.3	-4.7~11.2%	-2.5~6.7

した各植生の NPP 推定量を合わせて、全球の範囲で BRDF の影響による NPP 推定の誤差が明らかとなった (Table 5)。その結果は、BRDF の影響により、推定した 2003 年全球 NPP の BRDF による系統誤差は -2.5~6.7 PgC/yr であり、約 -4.3~11.3% である。

## 5 まとめ

全球 NPP 推定における BRDF の影響を調べるために、本研究では、地上で BRDF 観測で実測した分光反射率データから、針葉樹林、広葉樹林、草地と水田に対する BRDF の影響特徴を分析した上で、Ross-Li-R BRDF モデルを利用して、GLI の観測状態で、各植生地域の NPP 推定における BRDF の影響をシミュレーションした。その結果と全球土地被覆分類データ及び人工衛星 ADEOS-II/GLI データの大气補正済み全球モザイクデータを用いて推定した 2003 年全球陸域 NPP の分布データから、BRDF の影響による全球 NPP 推定の誤差が明らかとなっ

た。その結果は、推定した2003年年間全球NPPの積算値58.3 PgC/yrには、BRDFの影響によりの誤差が $-2.5 \sim 6.7$  PgC/yrであり、約 $-4.3 \sim 11.3\%$ である。

#### 謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構（JST）基礎的研究発展推進事業「発展，継続」第二研究領域の「発展研究（物理，情報分野）」の補助を受けた。また，本研究は千葉大学環境リモートセンシング研究センターと日本宇宙研究開発機構（JAXA）の共同研究となります。本研究は文部科学省フロンティア推進事業（平成11年度～平成20年度）により行われた。

#### 参考文献

- 1 W. Wanner, X. Li, and A. H. Strahler, "On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance", *Journal of Geophysical Research*, vol 100(D 10), pp. 21, 077–21, 089, 1995.
- 2 Y. Xiong, "A Study on Algorithm for Estimation of Global Terrestrial Net Primary Production using Satellite Sensor Data," Doctor Thesis (2005).
- 3 Furumi, S., A. Hayashi, K. Muramatsu, and N. Fujiwara, "Relation between vegetation vigor and a new vegetation index based on the pattern decomposition method", *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, vol. 18(3), pp. 17–34, 1998.
- 4 Zhang, L. F., S. Furumi, K. Muramatsu, N. Fujiwara, M. Daigo, and L. P. Zhang, "Sensor-independent analysis method for hyper-multi spectra based on the pattern decomposition method", Working Paper, Department of Economics, Doshisha University, Kyoto, Japan, 17, 2004.
- 5 Fujiwara, N., K. Muramatsu, S. Awa, T. Hazumi, and F. Ochiai, "Pattern expansion method for satellite data analysis", *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, vol. 16(3), pp. 17–34, 1996.
- 6 Muramatsu, K., S. Awa, A. Hayashi, N. Fujiwara, M. Daigo and F. Ochiai, "Pattern decomposition method in the albedo space for Landsat/TM and MSS data analysis", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21(1), pp. 99–119, 2000.
- 7 Daigo, M., A. Ono, R. Urabe, and N. Fujiwara, "Pattern decomposition method for hyper-multispectral data analysis", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25(6), pp. 1153–1166, 2004.
- 8 J. H. Chang, "The agricultural potential of the humid tropics," *The Geographical Review*, vol 58(3), pp. 333–361, 1968.
- 9 辻本裕子, "ADEOS-II/GLI モザイクデータを用いた土地被覆分類の研究", 奈良女子大学人間文化研究科情報科学専攻 2007年度修士学位論文, 2007.