

針葉樹林 NPP の推定における BRDF 影響

陳 璐, 古 海 忍
(奈良女子大学・科学技術振興機構 CREST)

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
(千葉大学リモートセンシング環境センター・科学技術振興機構 CREST)

醍 醐 元 正
(同志社大学経済学部)

Abstract

Global observing sensors, such as MODIS, AVHRR, GLI, have a large field of view. Since there is a need to take BRDF effect into account when using data of these sensors to analyze, for estimating the global NPP (Net Primary Production) and improving the accuracy of this estimation method simultaneously, it is necessary to know how this method was affected by BRDF effect. In this study, we focus the objective on coniferous forests, analyzing the sensitivity of BRDF effect on NPP estimation method with Ross-Li BRDF model, especially in GLI observation conditions. For obtaining BRDF data, BRDF observations have been held by radio-controlled helicopter.

1 はじめに

産業革命以来, 人間活動により大気中に排出された二酸化炭素は急速に増大し, 地球温暖化を抑制するために国際的な排出制限が行われることとなった。この中で森林は二酸化炭素の吸収源として注目され, その吸収量である純一次生産量 (NPP: Net Primary Production) を定量的に評価することが重要である。NPP は多くの方法を使用することで評価されていた。特に, 衛星センサーは全球を高頻度で観測でき, また, 継続的なデータが取得できることから, 衛星データを用いた精度のよい推定手法の確立が望まれる。

衛星に搭載されるセンサーが全球を観測する際, 視野角の幅が広く, 観測された分光反射率データには二方向性反射率 BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) 影響がある

ことが知られている。全球植生純一次生産量 NPP を求め、その精度を改善するためには、BRDF モデルを利用して、NPP の推定には BRDF の影響がどの程度であるかを評価する必要があると考えられる。本研究では三つの針葉樹林を対象物として、GLI センサーの観測条件において、NPP の推定に対する BRDF の影響をシミュレーションすることを目的とする。また、地上で観測角度を変えながら同じ対象物の反射率を測った BRF (Bi-directional Reflectance Distribution Factors) 観測のデータを用いる。

2 解析手法

2.1 BRDF モデル

本研究では Ross による体積的散乱モデルと Li 及び Strahler による幾何的散乱モデルを線形的に結びつけた Ross-Li モデル¹⁻⁴を使った。このモデルの二方向性反射率 R を以下のように示す。

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

なお、 θ , ϑ , ϕ はそれぞれ太陽天頂角、観測天頂角と相対方位角にあたる。ここで、 f_x はモデルのパラメータであり、地表面の種類によって違う。 f_{vol} と f_{geo} は体積的散乱と幾何的散乱の成分で、 f_{iso} は太陽が天頂にきた時に直下で観測された地表面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。体積散乱カーネル K_{vol} は植生の葉と樹高などの樹冠内部構造を表す。 K_{vol} の計算式は以下に示す。

$$K_{vol} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \xi\right) \cos \xi + \sin \xi}{\cos \theta + \cos \vartheta} - \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

$$\cos \xi = \cos \theta \cos \vartheta + \sin \theta \sin \vartheta \cos \phi \quad (3)$$

ここで、 ξ は位相角を表す。位相角は太陽と観測センサーの間の角度であり、位置を直接に表せる。幾何散乱カーネル K_{geo} は地形などの情報を表す。 K_{geo} の計算式は以下に示す。

$$K_{geo} = O(\theta, \vartheta, \phi) - \sec \theta' - \sec \vartheta' + \frac{1}{2}(1 + \cos \xi') \sec \theta' \sec \vartheta' \quad (4)$$

$$O = \frac{1}{\pi}(t - \sin t \cos t)(\sec \theta' + \sec \vartheta') \quad (5)$$

$$\cos t = \min \left\{ 1, \frac{h}{b} \frac{\sqrt{D^2 + (\tan \theta' \tan \vartheta' \sin \phi)^2}}{\sec \theta' + \sec \vartheta'} \right\} \quad (6)$$

$$D = \sqrt{\tan^2 \theta' + \tan^2 \vartheta' - 2 \tan \theta' \tan \vartheta' \cos \phi} \quad (7)$$

$$\cos \xi' = \cos \theta' \cos \vartheta' + \sin \theta' \sin \vartheta' \cos \phi \quad (8)$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \theta \right), \quad \vartheta' = \tan^{-1} \left(\frac{b}{r} \tan \vartheta \right) \quad (9)$$

上式によって、 K_{geo} に関わる項には、入射・放射幾何位置以外のパラメータ (b/r 及び h/b , b :

樹冠垂直半径, r : 樹冠水平半径, h : 樹高) があり, Kernel-driven 化するために, これらのパラメータには定数値を入れて利用する。本研究で多くの利用者が使われる一組の定数値 ($b/r = 2.5, h/b = 2.0$) を用いる。

2.2 NPP の推定手法

純一次生産量 (NPP) は総生産量 GPP より呼吸の損失量 R_d を差し引いて求められる。⁶⁻⁸

$$NPP = GPP - R_d \quad (10)$$

GPP は光合成量のある期間における積分値であり, 光合成量は人工衛星データから得られた植生指標 (VIPD) と光合成有効放射量 (PAR) を用いて推定する。

$$GPP = \int_0^{month} P(PAR(t), VIPD(t)) dt \quad (11)$$

ここで用いた植生指標 VIPD 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である。植生指標 VIPD は以下の通りに定義する。⁹⁻¹²

$$VIPD = \frac{(C_v - C_s - \frac{S_s}{\sum_{i=1}^n A_i} \times C_w + S_s)}{S_v + S_s} \quad (12)$$

上式の C_v, C_s, C_w はそれぞれ水・土壌・植生のパターン展開係数である。 S_v, S_s はそれぞれ植生と土壌の基本パターンの反射率和であり, 定数である。

また, (3) 式での光合成量 $P(PAR(T), VIPD(t))$ については下記のように決めた。¹³

$$P(PAR(t), VIPD(t)) = \frac{VIPD(t)}{VIPD_{std}} \times P_{std}(PAR(t)) \quad (13)$$

上式の $VIPD_{std}$ は地上実測反射率データより算出し定数 0.561 である。 $P_{std}(PAR(t))$ は下式で示す光・光合成曲線である。

$$P_{std}(PAR(t)) = \frac{0.53 \times 0.28 \times PAR(t)}{1 + 0.28 \times PAR(t)} \quad (14)$$

呼吸損失は様々な要因が影響すると考えられるが, 本研究では呼吸量 R_d が気温の効果のみを考えた経験式¹⁴より求められる。 T は気温 [°C] である。

$$R_d = \frac{7.825 + 1.145 \times T}{100} \times GPP \quad (15)$$

3 対象地域及び BRF 観測

本研究での対象地域は奈良県川上村に位置する奈良県有林井光経営区の杉林 (樹高約 10 m ~ 15 m) とカナダビクトリアにある二つ隣接松林 (A: 樹高約 30 m; B: 樹高約 5 m) である。

BRF 観測はラジコンヘリコプターで行われた。ヘリに載せたセンサーの観測波長範囲は 520 nm-920 nm であり, その波長帯に含まれる GLI の 5 つバンド (中心波長: 545 nm, 678 nm, 710

nm, 763 nm, 865 nm) を解析用のバンドとする。

4 解析結果及び検討

4.1 Ross-Li モデルのパラメータ

今回の針葉樹林 (奈良県杉林とビクトリア松林) に対するパラメータ f_{iso} を決めるため, BRDF 観測の各ポイントの幾何位置によってモデルのカーネル K_{vol} と K_{geo} を計算しており, また実測での反射率と式 (1) に代入する。最小二乗法で GLI 各バンドに対応するパラメータを決める。その結果を Fig. 1 に示す。

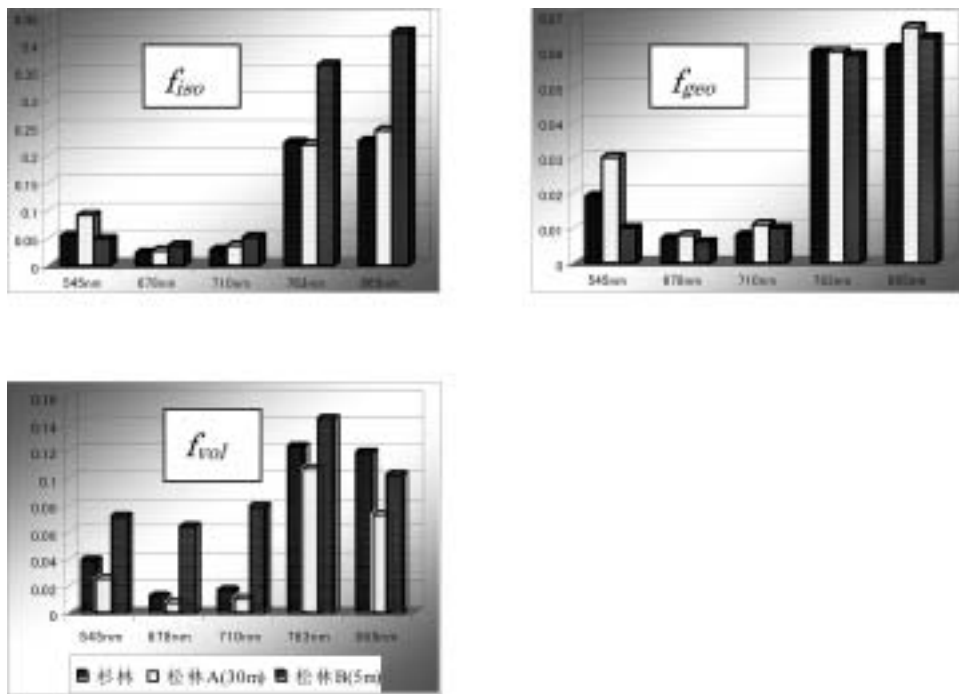


Fig. 1 Parameters (f_{iso} , f_{geo} , f_{vol}) of Ross-Li BRDF model which are corresponding with Japanese cedar forest and Douglas-fir A, B, respectively.

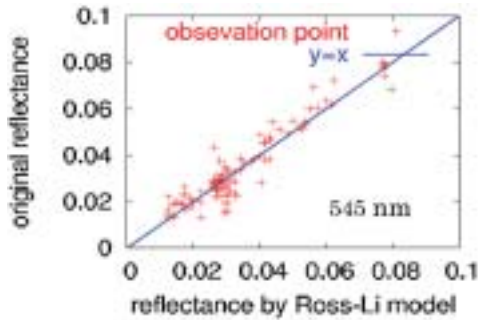
図 1 により, 三つの針葉樹林に対し, 地形などの情報を表す幾何散乱成分 (f_{geo}) がほぼ同じで, 葉の特徴と樹高などの樹冠内部構造を表す体積散乱成分 (f_{vol}) が違う。また, その差異が波長によって異なる。赤バンド付近 (678 nm) で, f_{vol} の差異が大きくて, 近赤外バンド付近 (865 nm) で, その差異が小さい。

4.2 Ross-Li BRDF モデルの適用性

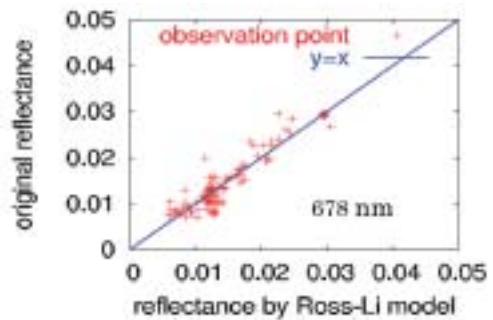
Ross-Li モデルから求めた BRDF 影響を除いた反射率を使う前に, このモデルは針葉樹林に

適用性を検証する必要がある。つまり、先程決められたモデルのパラメータと BRf 観測での各ポイントのカーネルから計算した反射率は実測した反射率の再現性を検討する。その結果は三つ針葉樹林には GLI の五つバンドに対応して、二つの反射率は約 $y=x$ の線形関係である。Fig. 2 は三つ針葉樹林に対する二つ反射率の比較結果を示す。

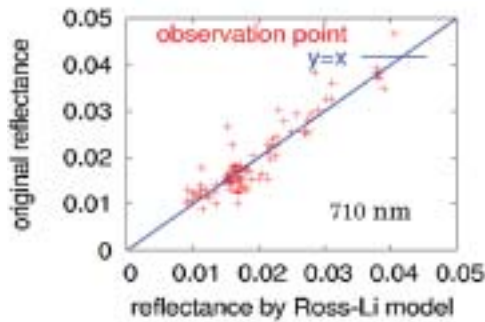
(I) As to the Nara's cedar forest



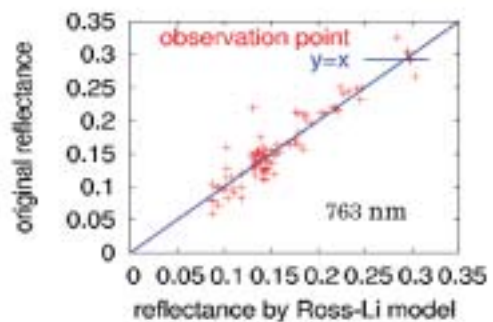
(a) Reflectance at 545 nm
Standard Deviation: 1.3%



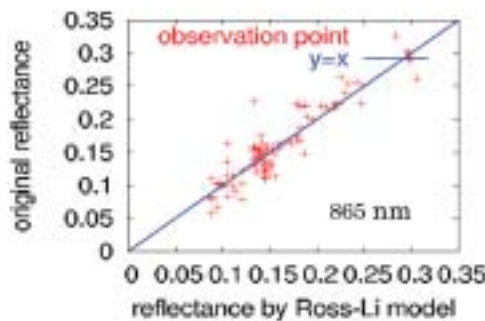
(b) Reflectance at 678 nm
Standard Deviation: 1.1%



(c) Reflectance at 710 nm
Standard Deviation: 1.5%

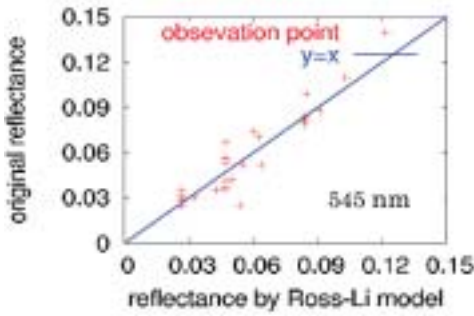


(d) Reflectance at 763 nm
Standard Deviation: 1.6%

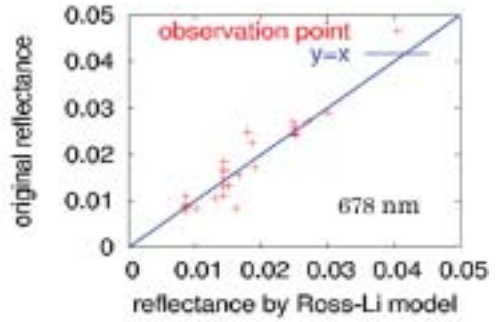


(e) Reflectance at 865 nm
Standard Deviation: 1.6%

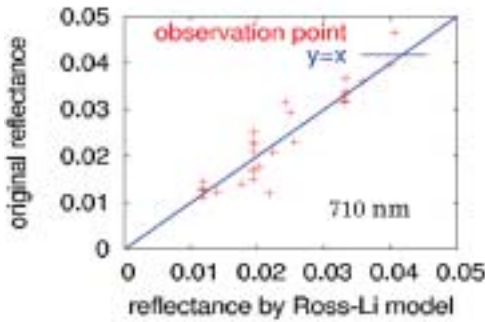
(II) As to the Victoria Douglas-fir forest A (30 m)



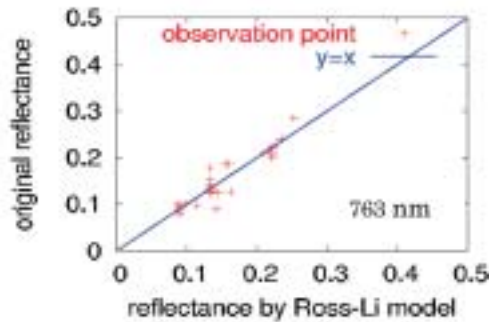
(a) Reflectance at 545 nm
Standard Deviation: 3.1%



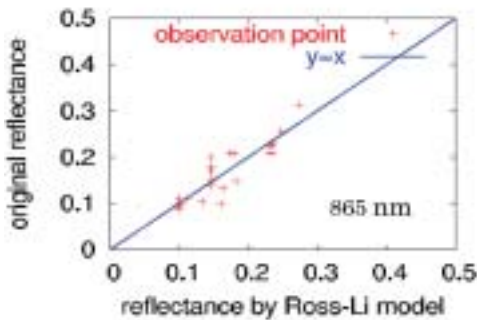
(b) Reflectance at 678 nm
Standard Deviation: 2.8%



(c) Reflectance at 710 nm
Standard Deviation: 2.7%



(d) Reflectance at 763 nm
Standard Deviation: 2.4%



(e) Reflectance at 865 nm
Standard Deviation: 2.7%

4.3 奈良県杉林の NPP の推定及び検証

奈良県杉林に対して、Fig. 1 に示す f_{iso} を用いて、式 (12) に代入し、植生指標 VIPD を求め、結果は 0.55 である。7 月奈良県の平均温度 25.0℃ として、日照時間は 12 時間とした。また、全天日射量データと合わせて、観測された 7 月の NPP を推定した。その結果は 0.36 kgCO₂/m²/month となる。その結果を検証するために、同じ対象地域で長期の森林調査が行われた。

(III) As to the Victoria Douglas-fir forest B (5 m)

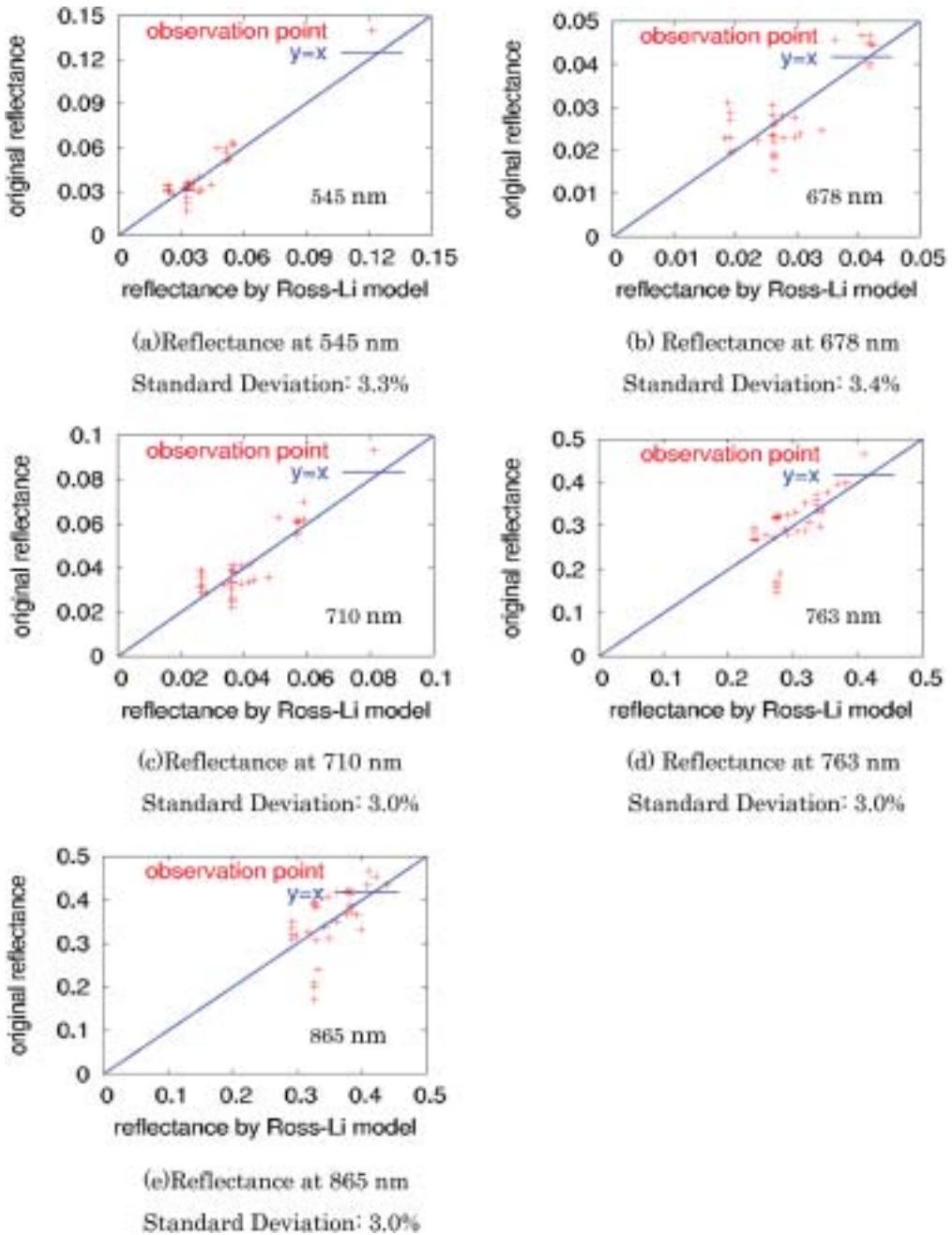


Fig. 2 The relationship between the original reflectance (Y-axis) and reflectance (X-axis) computed by the Ross-Li BRDF model using the BRF observations in the corresponding GLI data bands, for the Nara's cedar forest (I), the Victoria Douglas-fir forest A (II), and the Victoria Douglas-fir forest B (III), respectively.

森林調査の項目は胸高直径と樹高の測り及び落葉の回収を含む。森林調査のデータにより、7月のNPP結果は¹⁵0.32 kgCO₂/m²/monthとなる。二つのNPP推定結果は一致している。

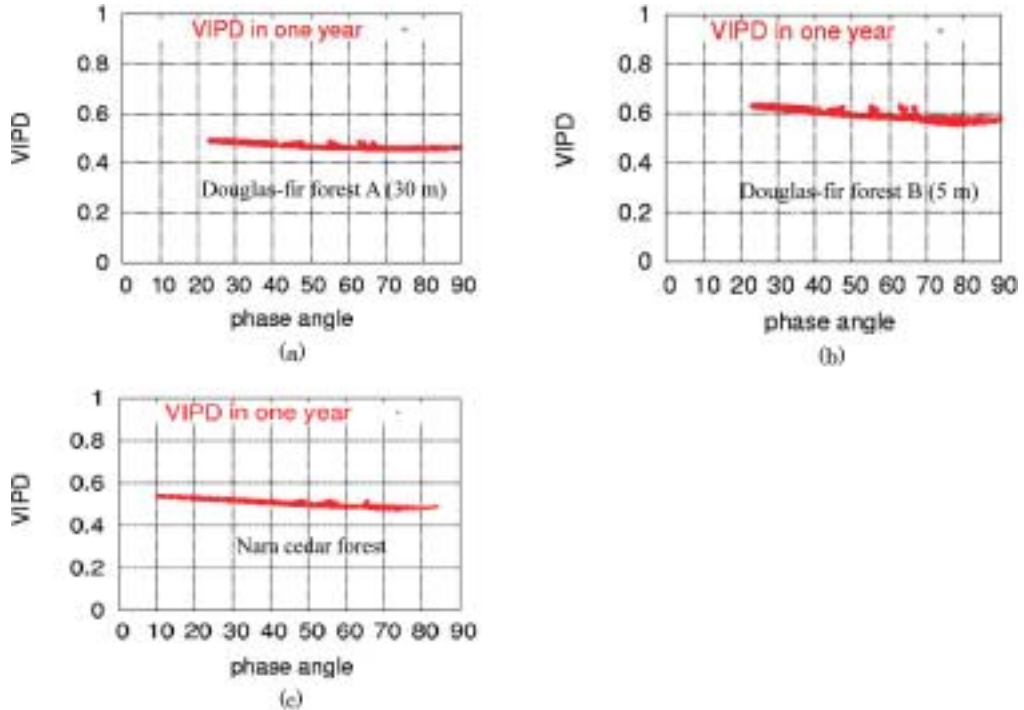


Fig. 3 The influence of BRDF effects over one year on the vegetation index VIPD at one observation point of Victoria Douglas-fir forest A (a) and B (b) and Nara cedar forest (c), respectively. The conditions were based on the GLI observation conditions.

4.4 BRDF により NPP 推定の感度分析

BRDF 影響により VIPD 及び NPP の変化を表す。ここで、その影響を評価するため、選んだパラメータは太陽と観測センサーの間の角度を表す位相角である。位相角は式 (3) のように求められる。

緯度・季節・時間によって太陽の位置が変わるので、BRDF 影響も変わる。そこで、GLI 観測状況にあわせて、三つの針葉樹林で BRDF 観測のある観測場所での年間 VIPD の変化を求めた。その結果は Fig. 3 に示す。

Fig. 3 により、位相角が大きくなると、VIPD の値が低くなる。そして、BRDF の影響を一番受けやすい（位相角：杉林 10° 、松林 23° ）VIPD 値と一番受ける（位相角：杉林 84° 、松林 90° ）VIPD 値を比較すると、7~11% 付近の違いがある（杉林：11%、松林 A：7%、松林 B：9%）。式 (10)~(15) より、NPP は VIPD と線形関係であるので、NPP も VIPD の場合と同じ BRDF の影響を受ける。

5 まとめと今後の課題

本研究では Ross-Li BRDF モデルの針葉樹林への適用性を検証し、パラメータ及び BRDF

の影響を除いた反射率を求めた。その上、GLIの観測状況で、針葉樹林に対して、BRDFの影響により年間VIPDあるいはNPPが最大11%変わることがわかった。

今後、異なる植生の種類（例えば、広葉樹林、草地など）に対するRoss-Li BRDFモデルの適用性を検証しつつ、NPPの推定モデルにBRDFの影響を分析する。その影響を考慮した上で、GLIデータを用いて全球NPPの値とその精度を求める予定である。

謝辞

本研究は、奈良県庁林政課と奈良県林業基金と川上村森林組合の支援を受けて実施されたものである。このことを附記し感謝の意を表します。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。また、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「全球高精度植生バイオマス推定の実用化」の補助を受けた。

参考文献

- 1 Li, X., A. H. Strahler. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 30276–30292, 1992.
- 2 Lucht, W., C. B. Schaaf, A. H. Strahler. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 38, 977–998, 2000.
- 3 Roujean, J. L., M. Leroy, P. Y. Deschamps. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 97, 20455–20468, 1992.
- 4 Wanner, W., A. H. Strahler, B. Hu, X. Li, C. L. Barker Schaaf, P. Lewis, J. P. Muller, M. J. Barnsley. Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: theory and algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 102 D, 17143–17162, 1997.
- 5 Wanner, W., X. Li, A. H. Strahler. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 100, 21077–21090, 1995.
- 6 Box, E. O., B. N. Holben, V. Kalb., 1989. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, 80, 71–89.
- 7 Liu, J., J. M. Chen, J. Cihlar and W. Chen., 1999. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data. *Journal of Geophysical Research*, 104 (D 22), 27735–27745.
- 8 Gower, S. T., C. J. Kucharik, J. M. Norman., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary productivity of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70, 29–51.
- 9 Furumi, S., A. Hayashi, K. Muramatsu, N. Fujiwara., 1998. Relation between vegetation vigor and a new vegetation index based on pattern decomposition method. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 18(3), 17–34.
- 10 Daigo, M., A. Ono, N. Fujiwara, R. Urabe., 2004. Pattern decomposition method for hyper-multispectral data analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 25(6), 1153–1166.
- 11 Fujiwara, N., K. Muramatsu, S. Awa, T. Hazumi, F. Ochiai., 1996. Pattern expand method for satellite data analysis. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 16(4), 41–49.
- 12 Muramatsu, K., S. Furumi, A. Hayashi, N. Fujiwara, M. Daigo, F. Ochiai., 2000. Pattern decomposition method in the albedo space for Landsat/TM and MSS data analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 21(1), 99–119.
- 13 Furumi, S., Y. Xiong, N. Fujiwara. Establishment of an algorithm to estimate vegetation photosynthesis by pattern decomposition using multi-spectral data, *J. Remote Sens. Soc. Japan*, 25(1), pp. 47–59, 2005.
- 14 Chang, J. H., 1968. The agricultural potential of the humid tropics. *Geographical Review*, 58(3), 333–361.

- 15 古海 忍, 村松加奈子, 陳 璐, 熊 彦. 奈良県スギ・ヒノキ林における現地調査による植生純一次生産量の測定 同志社大学ワールドワイドビジネスレビュー, 6(2), pp. 64-71, 2005.