

多方向放射観測に基づく葉面積指数の季節変化のモニタリング

Multi-angular optical remote sensing for monitoring seasonal changes of leaf area index

泉 岳樹 首都大学東京 都市環境科学研究科 助教

Takeki IZUMI Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, Japan · Assistant Professor

和文アブストラクト

本研究では、植生の凹凸が引き起こす不均一な散乱を捉えることができる多方向放射観測を森林樹冠上で行ない、この観測データを利用して、葉面積指数の推定を試みた。葉面積指数とは、単位面積あたりに存在する葉の片側表面積の合計であり、葉の量を表わす重要な指標である。植生は葉の表面を介して、大気との間で水・エネルギー・微量気体 (CO₂ など) の交換を行なっているため、「樹木の光合成促進」を定量的に評価するためには、葉面積指数を精度よく求めることが重要である。

研究対象としたのは、八ヶ岳山麓のカラマツ林であり、宇宙開発研究機構が所有する観測タワーを利用した多方向放射観測を頻繁に（春から秋にかけて毎月）行なった。そして、各季節の葉面積指数と多方向放射観測データとの関係を調べた。最終的には、観測を通して、多方向放射観測を用いて葉面積指数の季節変化をモニタリングする手法を開発した。

英文アブストラクト

This study aims to propose a new remote-sensing method using multi-angular remote sensing data for correctly assessing leaf area index (LAI).

LAI usually defined as the one-sided total leaf area of vegetation per unit land area, is an important biophysical parameter in ecophysiology, atmosphere-ecosystem interaction, and global climate change studies. Since energy, water, and trace gases are exchanged through the leaf surface, LAI is incorporated in many land surface models.

For this purpose, we established multi-angular optical remote-sensing system from the tower at mount foot of Yatsugatake (managed by JAXA), Japan in the last year. The change of the reflectances due to the change of the positions of the sun, canopy, and sensor geometry is called Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF). This year, we focused on and revealed the seasonal change and diurnal change of BRDF on *larix leptolepis* forest at Yatugatake.

1：研究目的

本研究では、植物の光合成能を把握するのに重要な植生資源量「葉面積指数 (Leaf Area Index, LAI)」の空間分布及び季節変化を衛星から高精度にモニタリングするための方法を確立することを最終的な目的としている。これまで全球の LAI の推定には、衛星から計算された植生指標(例えば Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)の利用が試みられてきた。しかし、既存の植生指標と LAI の関係は非線形であり、NDVI の場合、LAI との関係は指数関数で近似され、LAI が 2 以上になると推定精度が著しく落ちるといった問題があった。これは、既存の植生指標が植生の面的な広がりには捉えているが、立体的な構造(樹冠の凹凸)を評価できていないことに大きな原因があると考えられる。そこで、本研究では、多方向放射観測データから計算される、植生の立体構造を表す指標 HDS (Hotspot-Darkspot Signature) を活用し、高精度に葉面積指数を推定することを考えた。

対象を多方向から放射観測することにより、その反射輝度の変化を表したものをその物体の方向別反射特性 (Bi-directional Reflectance Distribution Function) と呼ぶ。方向ごとの輝度値の違いは、対象物体の立体構造と関係が深い。このため、衛星リモートセンシングの分野では、BRDF を用いた樹高などの三次元的な植生パラメータの推定 (Gao et al., 2003; Heiskanen, 2006, *Remote Sens. Environ.*) が期待されている。本研究はこの BRDF の利点を LAI の推定に用いようと考えたものである。

2：研究経過

現在、衛星で得られる多方向放射観測データは、地上分解能が粗く (7km×7km)、地上データとの比較はできない。また、BRDF は地上での実測が少なく、同一地点で季節変化を観測したデータはどの樹種に対しても存在しない。BRDF を用いた

植生モニタリングを実現するためには太陽天頂角の影響や季節変化の影響などについて実測研究が必要である。そのため申請者は、八ヶ岳南麓のカラマツ林 (北緯 35 度 54 分 34 秒, 東経 138 度 20 分 6 秒) にて、森林観測タワーに多方向放射観測システムを構築し、BRDF の日変化・季節変化を観測した。

BRDF を取得するためには対象の上に十分に立たせて、快晴日において短時間に観測角度を変えながら放射観測を行わなくてはならない。そのため、森林を対象とした場合ヘリコプターやタワーなど大規模な施設が必要であるため、実測例が非常に少なかった。本助成により、4 月から開始した多方向放射観測では、1 年間に 12 回の調査を実施し、植物季節にあわせた多方向放射観測データを取得している。これはカラマツ林に限らず森林を対象とした多方向放射観測としては世界ではじめて取得された画期的なデータである。

3：研究成果

植生を多方向から観測することによる反射率の変化は主に後方散乱方向と前方散乱方向に現れる。前方散乱方向では植生面の陰影を多く捉えるため反射率は低くなる (Darkspot)。一方、後方散乱方向で、特に太陽高度と観測角度が一致する方向では、日向葉のみを捉えるため、反射率は高くなる (Hotspot) (Lacaze et al., 2002. *Remote Sens. Environ.*) (図 1)。

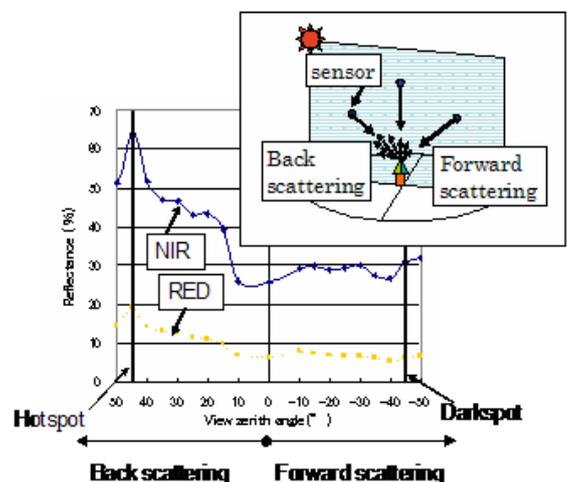


図 1 多方向放射観測の典型的な結果と模式図

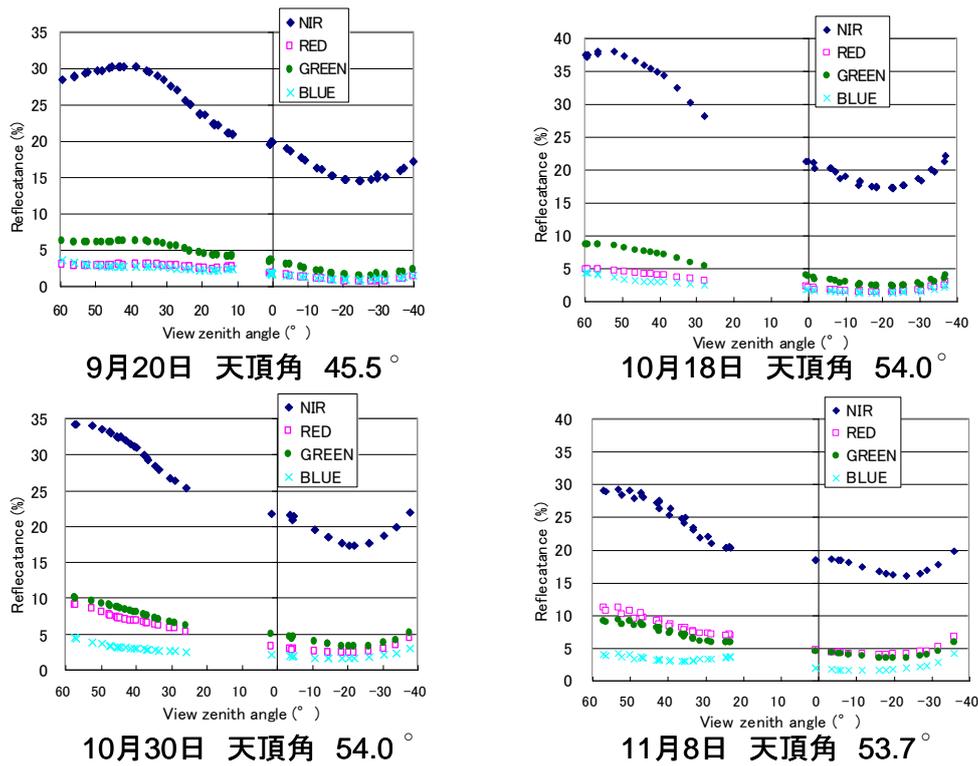


図2 カラマツ林における各植物季節（晩夏～落葉期）の方向別反射特性

このため本研究においても、対象とする植生と太陽が存在する鉛直面上（Principal plane）にて観測を行ない、観測角度にともなう反射率の変化の様子を捉え、これをBRDFの特徴とした。図2に各季節における観測結果の一部として、晩夏～落葉期におけるBRDFの特徴の季節変化を示す。図2より各植物季節において前方散乱方向における弱い反射と、後方散乱方向における強い反射は存在し、この二つの特徴は季節によって変わらないことが分かった。後方散乱方向において観測角度 $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ にデータが存在しないのは、観測タワーが放射計の視野角に入ってしまう、この影響が大きいと考えられたためである。

次に、BRDFの特徴を表す指標として、Lacaze et al. (2002. *Remote Sens. Environ.*) で提案された指標HDS (Hotspot-Dark Signature) に注目しその特徴を検討した。HDSは植生を多方向から放射観測した際、最も高い反射率（Hotspotの反射率）と、最も低い反射率（Darkspotの反射率）から以下の式で計算される指標である。

$$HDS = \frac{(\rho_{HS} - \rho_{DS})}{\rho_{DS}} \quad \begin{array}{l} \rho_{HS} = \text{Hotspotの反射率} \\ \rho_{DS} = \text{Darkspotの反射率} \end{array}$$

HDSの値は日陰葉と日向葉の割合と関係が深いことが、Chen et al., 2003, (*Remote Sens. Environ.*) で示されている。日陰葉と日向葉の割合は一日のうちの太陽天頂角によって日変化することが考えられるため、秋における快晴日に複数回多方向放射観測を行った。図3に同一日（2007年9月20日）におけるBRDFの変化（近赤外域）と太陽天頂角との関係を示し、図4に各バンドから計算されたHotspot・Darkspotの反射率と太陽天頂角との関係を示す。

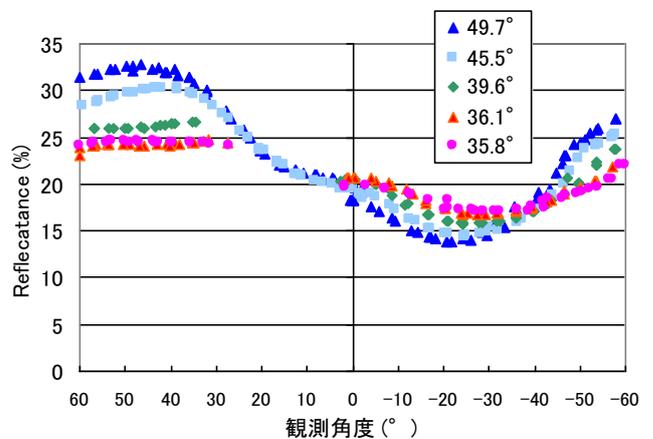


図3 方向別反射特性の日変化
(9月20日；晩夏)

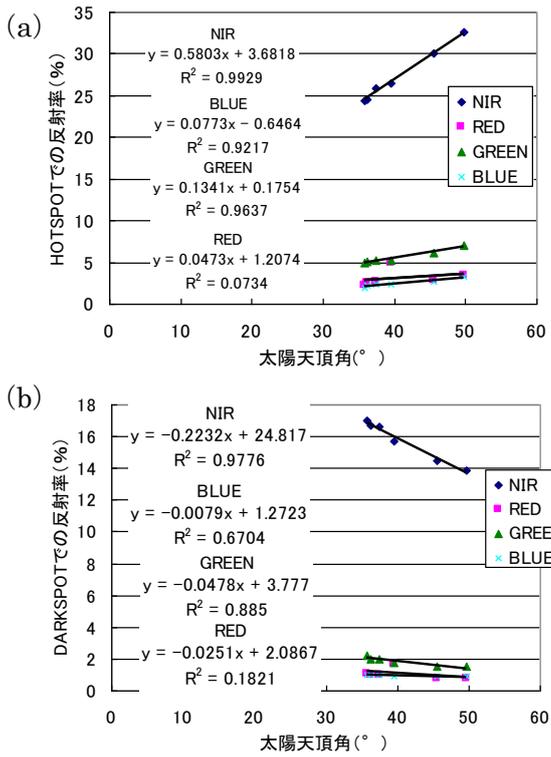


図4 Hotspot, Darkspot の反射率と太陽天頂角の関係
(a) Hotspot (b) Darkspot

図3より、BRDFは観測時の太陽天頂角に依存して変化し、Hotspotが出現する観測角度は、太陽天頂角とほぼ一致していることがわかった。また、Hotspot, Darkspotにおける反射率の大きさに注目すると、太陽天頂角が小さくなる（太陽が高度が大きい）ほどDarkspotの反射率は高くなり、Hotspotの反射率は低くなっている。両者の関係には、赤域を除き、有意水準1%で有意な線形の相関関係が見られた（図4）。そこでここから得られるHDSの値と観測時の太陽天頂角との関係を図5に示す。

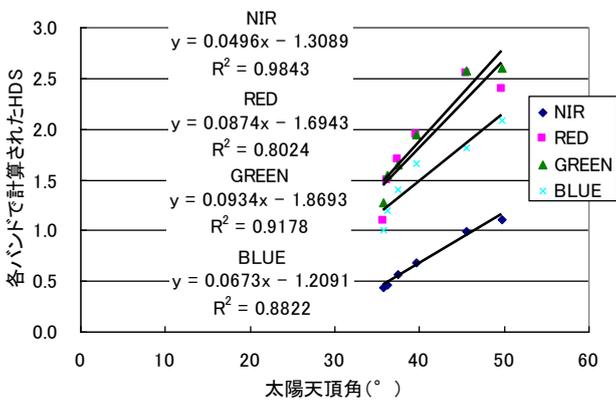


図5 HDSの日変化（観測時の太陽天頂角との関係）

図5に示されるように、HDSは観測時の太陽天頂角に依存して変化し、大きく日変化していることがわかった。長谷川ほか（2007, 森林学会予稿集）ではHDSを用いて、葉面積指数を評価する方法を提案している。しかし、他時期・多地点の多方向放射観測データからHDSを算出する場合、観測時の太陽天頂角をそろえる必要があると言える。本研究では一年間を通してBRDFを取得した。しかし観測時の太陽天頂角が異なるため、各季節で観測されたHDSを単純に比較することはできない。そこで、観測データから観測時の太陽天頂角条件が54°のものを選出し、晩夏～晩秋にかけHDSの季節変化を検討した。なお9月20日のデータに関しては、図4で示した関係式から観測角度54°の時のHotspotとDarkspotの反射率を類推しHDSを算出した。結果を図6に示す。

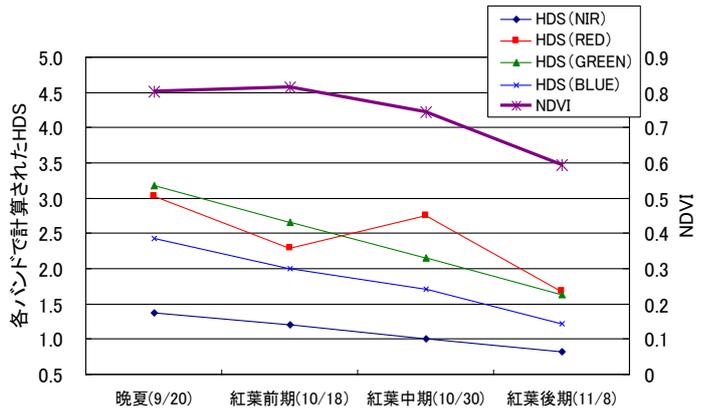


図6 HDSの季節変化（晩夏～落葉期）

図6より、夏から秋にかけてHDSの値は減少している様子が分かる。このことよりBRDFには季節依存性があるといえる。しかし、晩秋において葉が落ちても幹や枝が作る陰影が存在するため、植生のBRDFの特徴（強い後方散乱と弱い前方散乱）は存在し、HDSがマイナスになることは無い。以上の結果より、多地点・多時期のBRDFを比較する場合、太陽高度の影響と植物の季節変化の影響を考慮する必要があることがはじめて実証的に示された。

4: 成果の公表

泉 岳樹, 長谷川宏一, 松山 洋, 梶原康司, 本多嘉明;
「カラマツ林における方向別反射特性の季節変化～日向葉・日陰葉の反射率の差に注目して～」日本気象学会 2007年度秋季大会, 北海道大学, 2007年10月。