

6-6 スキャニングライダーによる植物群落構造解析

東京大学大学院農学生命科学研究科 細井 文樹、大政 謙次

はじめに

植物の持つ3次元構造は、光合成などの機能と密接にかかわっており、その生命活動の維持においてきわめて重要な役割を果たしている。植物の3次元構造を表す指標として、しばしばその垂直構造を表す指標である高さ毎の葉面積密度 (Leaf Area Density : LAD) が用いられる。

LADとは、植物を高さ方向にある幅を持った層に分割した場合、その層の単位体積あたりにどれだけの葉の面積が存在するかを表す量であり、これを算出して高さ方向にプロットすることで、垂直方向の葉面積分布を表すプロファイルを作成することができる。計測上、茎や葉などの地上部器官の分離が困難でLADが求められない場合は、地上部全器官の投影面積を取り扱う植物面積密度 (Plant Area Density : PAD) がLADの代わりに用いられる。

LADやPADの計測には、これまで、対象植物を層毎にサンプリングする層別刈取り法などの直接計測法が用いられる場合が少なかった。しかし、その計測には多大な労力を必要とし、また対象植物の破壊が伴う点が問題となる。一方、Gap fraction法などの間接法も非破壊かつ効率的な計測方法として植物構造計測に使用されているが¹⁾、過小評価が生じるという計測精度の問題や、曇天や早朝、夕方などの光条件下での計測が必要であるなどの計測条件の制約が問題となる。

近年、スキャニングライダーとよばれる装置が植物の3次元構造計測に利用されるようになってきた^{2,3)}。この装置はレーザービームを対象にスキャン照射し、散

乱して戻ってくる光を受光して対象までの距離を算出、対象の3次元点群画像を得るというものである。スキャニングライダーでは、対象植物の3次元点群画像を非破壊・非接触に高速で効率よく、かつ高い空間精度で取得可能である。とくに地上設置型の可搬型スキャニングライダーは、mm ~ cmオーダーのきわめて高い距離精度および空間分解能を有しており、自動化されたスピーディなデータ取得が可能といった利点があるため、既往の植物構造計測法の問題点を解決することが可能である。そこで本稿では、主として可搬型スキャニングライダーを用いた樹木および作物群落の垂直構造測定法とその解析法について解説する⁹⁾。

方法

スキャニングライダーを用いた計測法においては、レーザービームが対象植物の樹冠全体にわたって、その内部までもれなく照射されるように配慮する必要がある。そのため、対象を取り囲む位置にライダーの計測点を設置し、さらに対象に入射するレーザービームの入射角 (天頂角) の最適化を行う必要がある⁴⁾。複数の計測点から取得されたデータは、それぞれ独立した座標系を有しているため、これらを共通の座標系に位置合わせ (レジストレーション) し、共通の座標系とする。得られた3次元点群データから、以下の式によってボクセル座標系への変換を行う。

$$i = \ln\left(\frac{X - X_{en}}{\Delta i}\right) + 1 \quad j = \ln\left(\frac{Y - Y_{en}}{\Delta j}\right) + 1 \quad k = \ln\left(\frac{Z - Z_{en}}{\Delta k}\right) + 1 \quad (1)$$

(i, j, k) はボクセル座標、 Int は最も近い整数に数値を丸める関数、 $(X_{min}, Y_{min}, Z_{min})$ はもとの点群座標系 (X, Y, Z) の最小値、 $(\Delta i, \Delta j, \Delta k)$ はボクセルエレメントサイズである。ここでボクセルとは、3次元格子点上の立方体を意味し、2次元のピクセルを3次元に拡張したものに相当する。ボクセルエレメントサイズとはボクセル一個のサイズを指し、ライダーの分解能や計測精度によって決められる。式(1)を使用してもとの点群データをボクセル座標系に変換し、変換後のそれぞれのボクセルの属性値を1として、コンピューターのメモリ内に格納する。属性値が1とは、その場所においてレーザービームが対象木にあたったということを意味する。次にボクセルアレイのうち、属性値1が与えられていないボクセルに対し、別の属性を与えるため、実際にライダー計測時に照射されたレーザービームの全光跡を、コンピューターのメモリ内に用意したボクセルアレイのなかでトレースする計算を行う。あるボクセルが少なくとも1本以上のレーザービームと交わり、かつその属性が1でない場合、そのボクセルには属性値として2を与え、メモリに格納する。属性値2を持つボクセルとは、その位置でレーザービームが少なくとも1本以上通過したことを意味する。各ボクセルに付与された属性値をもとに、以下の式によりLADを算出する。

$$LAD(h, \Delta H) = \frac{\cos \theta}{G(\theta)} \cdot \frac{1}{\Delta H} \sum_{k=m_h}^{m_h+\Delta H} \frac{n_1(k)}{n_1(k) + n_p(k)} \quad (2)$$

θ はレーザービームの入射角(天頂角)、 ΔH は垂直方向の層の厚み、 m_h と $m_h + \Delta H$ は実際の高さ h と $h + \Delta H$ に相当するボクセル座標系での高さ方向の値、 $n_1(k)$ と $n_p(k)$ はそれぞれボクセルアレイ内で k の高さにある層の属性値1と2を持つボクセルの数である。項 $n_1(k) / (n_1(k) + n_p(k))$ は k の高さの層においてレーザービームが対象木に衝突した頻度(Contact frequency)を表している。 $\cos \theta / G(\theta)$ の項はレーザービーム入射角 θ におけるレーザービームの軌跡長と葉傾斜角分布の影響を補正する項である。このうち $G(\theta)$ はレーザービームの方向と直交する平面への葉の投影面積の平均値である。これ以外に非同化器官(幹や枝)の補正も行う(次項2. 広葉樹群落での実験を参照)。ここまでの一連の計測および解析方法はVCP(Voxel-based Canopy Profiling)法とよばれている¹⁾。

実験と結果

1. 孤立木での実験

最初のステップとして、取扱いが容易な孤立木を用い、可搬型スキャニングライダーを用いたLAD推定法であるVCP法の妥当性が確認された⁴⁾。供試材料としては樹高約1.6mのサザンカ(*Camellia sasanqua* T.)を使用した。使用した可搬型スキャニングライダーは三角測量を測距原理とした高精度タイプで、距離精度および空間分解能はそれぞれ1mmと2mm(対象との距離5mの場合)であった。樹木を取り囲む4箇所から測定を行い、レーザービーム入射角を37.5°~180°まで変え、最適入射角の検討を行った。ボクセルエレメントサイズはライダーの空間分解能から、1mm×1mm×1mmとし、トータルボクセル数700×700×1,600個のボクセルアレイを計算機上に確保した。4地点から取得されたデータを基に式(1)と(2)より各高さのLADを計算した。その際、葉傾斜角の補正のため、分度器を用いてすべての葉の葉傾斜角を測定して葉傾斜角分布を求め、式(2)中の $G(\theta)$ を算出した。そして、得られた計算結果と実測(層別刈取りにより取得)との比較を行った。

その結果、本供試材料においてはビーム入射角59.8°でも高精度な結果が得られ、平均絶対誤差率(Mean Absolute Percent Error: MAPE)は17.4%と良好な結果が得られた。まず孤立木にて、VCP法の有効性が確認された。

2. 広葉樹群落での実験

次に広葉樹群落において、VCP法の妥当性が検討された⁵⁾。測定サイトは茨城県つくばみらい市にある人工林で、そのなかにある樹高10~13mのケヤキ(*Zelkova serrata* (thunb.) Makino)群落を2005年7月に測定した。測定に際しては4×8mの測定プロットを林床に設置し、そのプロット内部に2×2mのコドラートを8個設置した。LADの実測については、測定プロットの上5~13mの高さにわたって、一個あたり2×2×0.5mの容積を持つセルを計128個設定し、このセル単位で内部に含まれるすべての葉を採取し、面積を測定した。ライダーによる測定は、Time of flight法を測距原理とする距離精度±8mmのタイプの可搬型スキャニングライダーを使用し、測定プロットを取り囲む6箇所の測定点を設置し、計測を行った。レーザービーム入射角は47.2°、57.8°、71.3°、90.0°の4水準とした。得られたデータの処理は孤立木での実験(前項参照)同様で、式(1)と(2)を各コ

ドラフト単位ではめてLADプロファイルを算出した。その際、葉傾斜角の補正を行うため、孤立木での実験で使用したものと同一高精度タイプの可搬型スキャニングライダーを用いて、群落の一部の3次元データを取得した。このライダーは高精度であり、その画像から個々の葉を肉眼で識別することが可能であった。そこで、葉に相当する点群を目視によりランダムに200個選択し、各葉を3次元平面に近似し、その平面の法線ベクトルの天頂角から葉傾斜角を算出し、葉傾斜角分布を得て、補正に使用した。非同化器官については2006年2月の落葉期に再度同一対象をライダーで測定し、ここで得た葉のない状態のライダーデータを葉のある状態である2005年7月測定の前データより差し引くことによって、その分離を行った(図1)。

図2に得られたLAD算出結果の例を示す。ライダーポジションに近いコドラートでは入射角によらず精度のよい結果が得られたのに対し(図2a)、測定プロット中央部にあるコドラートでは90.0°以外の角度で過小評価になる傾向があった(図2b)。ライダーポジションに近いコドラートでは中央部のコドラートよりもレーザーの軌跡長が短く、より多くのレーザービームが到達するため、高い精度の結果が得られたものと考えられる。一方、ライダー設置点から遠いコドラートの場合は、レーザービーム入射数が多くないために誤差が大きくなる傾向があるが、レーザービーム入射角を選択(本計測例では9.0.0°すなわち水平)することで、高い精度の結果が得られることが示された(図2b)。このことから、レーザービーム入射数とレーザービーム入射角度が精

度に関係する要因であることが明らかとなった⁵⁾。

3. Laser beam coverage index Ω

実際のフィールドでVCP法によってLADの計測を行う場合、その精度を層別刈取りなどの実測によって検証することは困難な場合が多く、実測データなしで、VCP法により求められたLAD推定精度を見積もれる指標があれば、非常に有益である。そこで広葉樹群落での実験でのVCP法における計測誤差要因等を考慮しながら、スキャニングライダーによる広葉樹群落LAD計測誤差を見積もる指標を得るため、ライダーのレーザービーム照射に関する設定と、対象木の構造パラメータを関連させた以下の指標 Ω (Laser beam coverage index)を考案した³⁾。

$$\Omega = A_{beam} \times N \exp(-K \times LAI_{cum}) \quad (3)$$

ここで A_{beam} 、 N および K はそれぞれ計測プロットに入射するレーザービームの面積(m^2)、入射密度(shots/ m^2)および消散係数を表し、 LAI_{cum} はライダーデータから計算される各高さの積算葉面積指数を表す。 A_{beam} と N はライダーのレーザービームの設定にかかわる係数であり、 LAI_{cum} は群落構造にかかわる係数、 K はライダーの設定(レーザービーム入射角)と群落構造(葉傾斜角分布)の両方にかかわる係数である。この指標はターゲット領域の各高さの水平断面がどのくらい漏れなくレーザービームに照射されているかを表している。値が1より小さい場合、ターゲットの水平断面のうち、レーザー

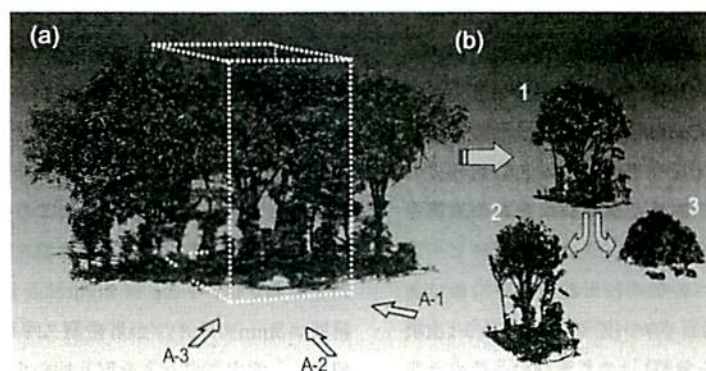


図1 可搬型スキャニングライダーにより計測されたケヤキ群落の3次元点群画像⁵⁾
(a) 計測されたケヤキ群落と計測プロット(破線部)。A1～A3は各計測地点からの可搬型スキャニングライダーのレーザービームの方向を示す。(b) 葉とそれ以外の部分の分離の様子。1: 分離前、2: 分離された葉以外の部分(幹、枝、下層植生、地面)、3: 分離された葉

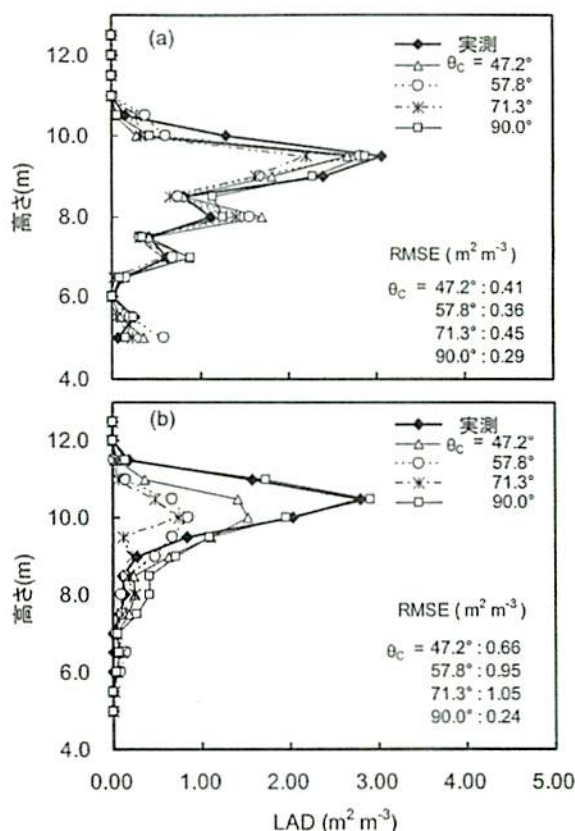


図2 VCP法により算出されたコドラート単位のケヤキ群落LAD計測結果⁵⁾
 (a) ライダー設置位置に近いコドラート、(b) ライダー設置位置から遠い計測プロット中央のコドラート。θ_c: レーザービームの中心入射角、RMSE: 平均平方二乗誤差を表す

ビームがカバーしきれていない領域が存在することを示し、値が1以上の場合はビームがもれなく断面を照射していることを示す。

ΩとLAD推定の絶対誤差との関係を示したのが図3である。Ωが2を下回ると誤差が急激に増大し、2を超えると誤差は小さくなっていくことが示された。ビームがもれなく水平断面をカバーするほどに群落内部から得られる情報量が増し、精度が向上することがわかる。理論上は1を超えれば十分と考えられるが、ビームが重複して当たる領域も考慮に入れると、高い精度のLAD推定値を得るためには、実用上Ωが2を大きく上回る必要があることが確認された。また、図3には可搬型ライダーだけでなく、同一エリアを航空機ライダーで計測したデータから、ボクセル法によりLADを推定した結果に対するΩとの関係も示してある。その傾向は可搬型と同様であり、計測条件のまったく異なる種類のラ

イダーであっても、本指標は共通に使用できることが示された。

4. 作物群落での実験

VCP法は上述したような木本植物だけでなく、作物などの草本植物にも有効である。ここではイネを対象とした場合のVCP法の有効性について解説を行う。具体的には、VCP法をイネの育成ステージ毎の垂直構造計測にも応用した^{7,8)}。

イネの場合は葉と茎、穂の分離がライダーデータではできないため、植物面積密度 (Plant Area Density: PAD) の垂直分布を算出することにした。実験は茨城県つくばみらい市の水田で行われた。水稻品種はコシヒカリ (*Oryza sativa* L. cv. Koshihikari) で、2010年5月1日に株間、条間ともに30cmにて機械移植された。倒伏防止のため、追肥は行われなかった。計測は2010年5

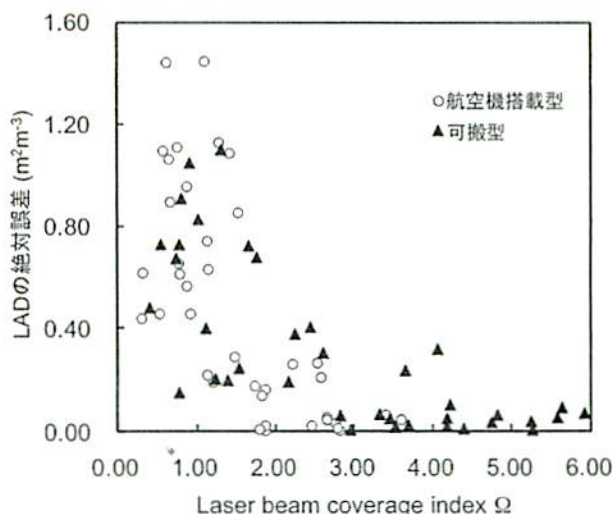


図3 ケヤキ群落における Laser beam coverage index Ω と LAD 絶対誤差との関係³⁾
○、▲はそれぞれ航空機搭載型、可搬型スキャニングライダーの場合を示す

月27日、6月17日、7月13日、8月14日に行われ、これらはそれぞれ移植期、分けつ期、幼穂形成期、登熟期に相当した。異なる4つの成長ステージの計測のために、水田の中に1.2m×1.2mの矩形の計測プロットが4か所設置された。使用した可搬型ライダーは孤立木での実験で使用したものと同じ高精度タイプのものである。レーザービーム入射角はイネの葉傾斜角を考慮して、30°とした。PADの計算は式(1)と(2)を用い、LADをPADに置き換えて行った。さらに補正に必要な葉傾斜角分布に関しては、まず各生育ステージのライダー3次元点群画像から、葉に相当する点群を目視により抜き出し、それぞれの葉を15mmずつの小片に分割した。その小片をランダムに200個選択し、それらを3次元平面に近似し、その平面の法線ベクトルの天頂角から葉傾斜角を算出し、生育ステージ毎の葉傾斜角の分布を得、補正に使用した。

結果を図4に示す。ビームが届かない一部の層(8月最下層等)を除いて、全体としては各成育ステージ毎の正確なPAD値を算出することができた。この計測ではレーザービーム入射角を水平よりは垂直に近い30°という角度にしたため、群落内を進むレーザービームの軌跡長が比較的短くなっており、群落内を進む間に群落に衝突して失われるビームの数を抑えるような設定を施している。これにより、ターゲット領域内の群落

内部にレーザービームが十分に届き(ただし8月の最下層などはその限りでない)、全体としては正確な生育ステージごとのPAD垂直分布が得られたものと考えられる。これより、VCP法は作物群落の垂直構造の推定にも有効であることが示された。

さらに考案したLaser beam coverage index Ω (前項参照)をイネについても適用し、PADの絶対誤差と比較したのが図5である³⁾。ここでは追加検討したビーム入射角0°の結果も比較のために載せてある。ケヤキ群落を対象とした図3の結果同様、 Ω が2を下回ると誤差が急激に増大し、2を超えると誤差は小さくなっていくことが示された。木本とは種類の異なるイネのような草本群落においても、 Ω は誤差を見積もるための指標として利用可能であることが示された。

おわりに

本稿ではスキャニングライダーを用いた樹木の葉面積密度(LAD)又は植物面積密度(PAD)の垂直分布を得るためのVCP法について解説を行った。この方法は、対象を取り囲む測定位置の設定、レーザービーム入射角の最適化、得られた点群データのボクセル化とレーザービームの葉に対する接触頻度の計算、非同化器官および葉傾斜角の補正というプロセスによって、LADまたはPADの垂直分布を算出するものである。この方法は

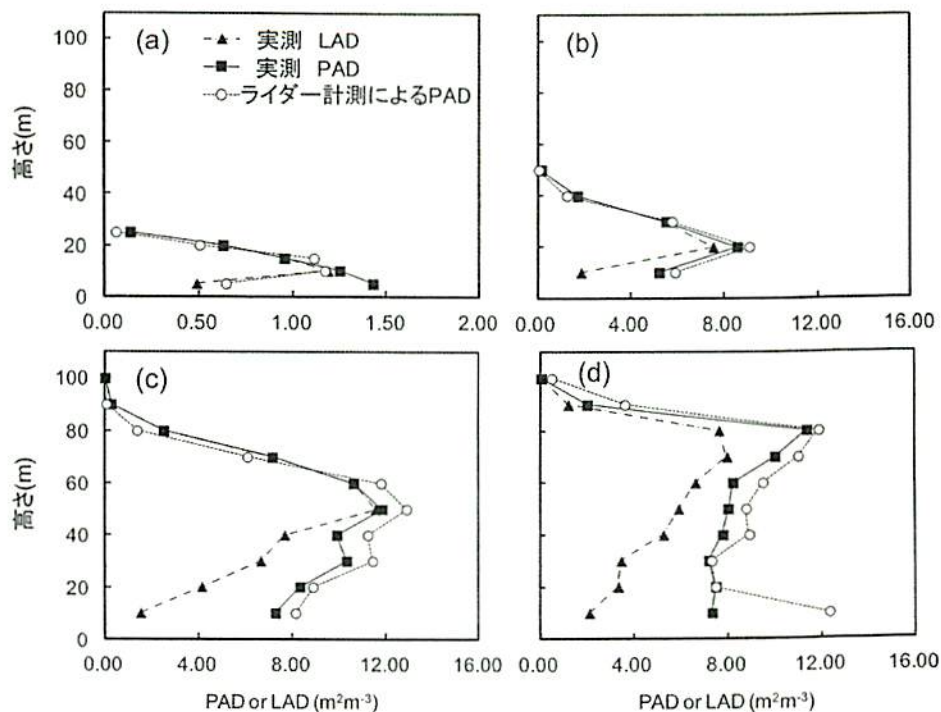


図4 VCP法により算出されたイネ群落生育ステージ毎のPAD垂直プロファイルと直接計測により得られたPADおよびLADの垂直プロファイルの比較⁷⁾
 (a) 5月27日、(b) 6月17日、(c) 7月13日、(d) 8月14日

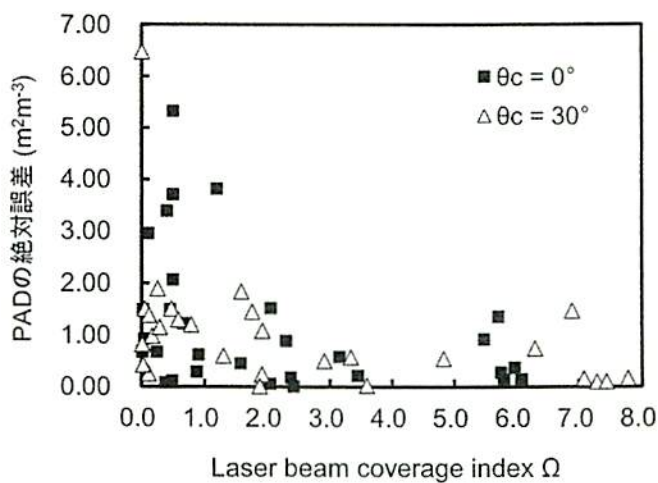


図5 イネ群落における Laser beam coverage index Ω と PAD 絶対誤差との関係⁸⁾
 θ_c : レーザービームの中心入射角

最初に孤立木に適用され、正確なLADプロファイルが得られた。

次に本方法は広葉樹群落に適用され、そのLAD精度が設置したコドラート毎に異なり、レーザービームが十分に到達しているコドラートでは高い精度のLADプロファイルが得られた。また、レーザー入射角度によっても精度に違いが見られた。

こうした誤差要因に基づき、LAD又はPADの誤差を見積もる指標として、ライダーのレーザービーム照射に関する設定と、対象木の構造パラメータとを関連させたLaser beam coverage index Ω が考案され、 Ω によって広葉樹群落のLAD推定誤差を見積もることが可能であることが示された。また、計測条件が互いに異なる可搬型および航空機搭載型ライダーにおいても、共通に本指標が適用可能であることが示された。

さらに、VCP法を作物(イネ)群落に応用し、イネの各成長ステージ毎の特徴的なPADプロファイルを測定できることが確認された。そして、イネについてもPAD誤差が Ω によって説明可能であることが示され、木本のケヤキ、草本のイネといった構造が大きく異なる植物群落において、 Ω が共通に適用可能であることが示され、本指標 Ω が一般性の高い実用的指標であることが示された。

本稿で解説した計測のうち、とくにイネにおいては、地上部全器官のPADとしてだけでなく、葉、莖、穂と

いった器官毎の面積密度に分離する方法(たとえば分光情報の利用など)を検討することが今後は必要である。それによって、作物の収量や器官別バイオマスの推定などにも活用範囲を広げていくことが必要であると考えられる。加えて、本方法をさらに多くの木本、草本群落に適用し、その適用可否を検証していくことが今後は重要であると考えられる。

【参考文献】

- 1) Welles J M, Cohen S : J. Exp. Bot., 47 (302): 1335-1342, 1996.
- 2) Omasa K, et al. : J. Exp. Bot., 58 (4): 881-898, 2007.
- 3) Hosoi F, et al. : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 48 (5): 2215-2223, 2010.
- 4) Hosoi F and Omasa K : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 44 (12): 3610-3618, 2006.
- 5) Hosoi F and Omasa K : J. Exp. Bot., 58 (12): 3463-3473, 2007.
- 6) Hosoi F and Omasa K : ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 64(2): 151-158, 2009.
- 7) Hosoi F and Omasa K : Eco Engineering, 24(1): 21-25, 2012a.
- 8) Hosoi F and Omasa, K : ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 74(1): 11-19, 2012b.
- 9) Hosoi F : Eco-Engineering, 25(1), in press.