レーザスキャナを用いたカラマツ群落の 三次元構造の測定

武田知己*・小熊宏之*・米 康充**・藤沼康実*

(* (独) 国立環境研究所)
(** (株) パスコ)

Measurement of 3-D Structure of Japanese Larch (*Larix kaempferi* Sarg.) by Laser Scanner

Tomomi TAKEDA*, Hiroyuki OGUMA*, Yasumichi YONE** and Yasumi FUJINUMA*

(* National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-8506 Japan)
(** PASCO Corporation, Meguro-ku, Tokyo, 153-0043 Japan)

Abstract

In this study, in order to measure the three-dimensional structure of forest, a new technique using a laser scanner was developed in a five-year-old Japanese larch community with a tree height of about 5 m grown at the experimental field of the National Institute for Environmental Studies. The Japanese larch community was divided into cubic cells, and plant area density (PAD) was calculated for each cubic cell from the gap fraction, which is the probability that a laser beam passes through a cubic cell. Leaf area density (LAD) was estimated from the difference between PAD measured in November 2003 and wood area density (WAD) measured in March 2004. Average plant inclination angle (APIA) and average leaf inclination angle (ALIA) were also calculated.

In order to verify a measuring method with a laser scanner, a comparison with the vertical distribution of LAD measured by the stratified clipping method was conducted. Although PAD measured with the laser scanner overestimated LAD measured by the stratified clipping method by a factor of two ($r^2=0.98$), the relation of 1:1 was found by LAD measured with the laser scanner and measured by the stratified clipping method ($r^2=0.94$). The vertical distribution of LAD had a peak from 1 m to 2 m, and was well in agreement with the vertical distribution measured by the stratified clipping method. The three-dimensional distribution of LAD showed not only vertical distribution but also horizontal heterogeneity of canopy. ALIA calculated as an average of canopy was 57.5 degrees. In conclusion, the method with the laser scanner was able to measure the three-dimensional structure of forest.

Key words: Gap fraction, Japanese larch, Laser scanner, Leaf area density, Stratified clipping method.

キーワード: ギャップフラクション, 層別刈り取り法, ニホンカラマツ, 葉面積密度, レーザスキャナ

1. はじめに

森林の群落構造は、森林に入射した日射の吸収・散乱過程と密接な関係があることから、群落構造を詳細に測定することは、森林のCO₂固定量の推定 (Running

and Coughlan, 1988; Kurachi *et al.*, 1993) や、リモートセンシングを用いた反射特性の研究 (Verhoef, 1984; Kuusk, 1995; Myneni *et al.*, 1995) において重要である。日射の吸収・散乱過程に影響を及ぼす森林の構造パラメータとして、単位体積当たりの葉や木部の面積である植物面積密度 (PAD: Plant Area Density) や、葉や木部の平均傾斜角 (APIA: Average Plant Inclination Angle) が用いられる。また、葉は光合成やエ

2004年5月19日, リモートセンシング学会第36回大会にて発表

2004年6月28日 受付, 2004年10月27日 受理

エネルギー交換にとって特に重要な役割を果たしていることから、単位体積当たりの葉の面積である葉面積密度 (LAD: Leaf Area Density) や、葉の平均傾斜角 (ALIA: Average Leaf Inclination Angle) も用いられる。

群落構造を測定する方法に関しては、リタートラップを用いた方法 (Aber, 1979; Morrison, 1991) や相対成長を利用した方法 (Smith *et al.*, 1991; Deblonde *et al.*, 1994) など、数多くの研究が行われてきた。こうした群落構造の測定法のなかでも、Wilson (1960) によって開発されたポイント・コドラート法は、群落構造を非破壊かつ簡単に測定する方法として広く応用されている Gap Fraction 法へ発展する非常に重要な方法である。

ポイント・コドラート法は、細い針を天頂角 θ で群落に挿入し、針の先端と植物体の接触回数から PAD を推定する方法である。次式に、接触回数と PAD の関係を示す。

$$N(\theta) = \mu h G(\theta) / \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 $N(\theta)$ は天頂角 θ における接触回数、 μ は PAD、 h は針が移動した距離の垂直成分、 $G(\theta)$ は θ に対して垂直な平面への葉や木部の単位面積の平均投影面積であり、APIA と関係するパラメータである。

ポイント・コドラート法では、群落のスケールが大きくなった場合に接触回数を測定することは困難である。そこで、接触回数かわりに、群落に挿入した針の先端が植物体に接触せずに通り抜ける確率、すなわち、群落を天頂角 θ の方向からみたときの樹冠の間隙率である Gap Fraction から PAD と APIA を測定する方法が開発された。

$$P(\theta) = \exp\{-N(\theta)\} = \exp\{-\mu h G(\theta) / \cos \theta\} \quad (2)$$

ここで、 $P(\theta)$ は天頂角 θ の方向から森林をみたときの Gap Fraction である。式 (2) から PAD と APIA を計算するためには、異なる天頂角 θ に対して $P(\theta)$ を測定する必要があり、Miller (1967)、Lang (1986)、Norman and Campbell (1989) に詳しい計算方法が述べられている。群落構造を測定する方法として広く用いられているプラントキャノピーアナライザ (LAI-2000, Li-Cor) は、異なる 5 つの天頂角から入射してくる日射が樹冠を通過する確率から Gap Fraction を測定しており (Welles and Norman, 1991; Yamamoto *et al.*, 1995)、魚眼レンズを使った測定では、林床から真上に向けて撮影した全天空画像から樹冠と天空の割合を求め、Gap Fraction を測定している (Rich, 1990; Utsugi *et al.*, 2001)。プラントキャノピーアナライザや全天空画像を用いた方法は、測定対象とする森林の樹種構成に

依存せず、群落構造を少ない労力で非破壊測定が可能であるが、PAD と APIA を群落全体の平均的な値としてしか測定できない。

これに対して近年、レーザスキャナを用いた森林の計測技術が注目されるようになってきた。例えば、地上設置型レーザスキャナを用いた立木位置と胸高直径の自動計測手法の開発 (Omasa *et al.*, 2002; Yone *et al.*, 2003) や、航空機搭載型レーザスキャナ (航空機 Lidar) による樹高と樹冠直径の測定 (Yone *et al.*, 2002) などが挙げられる。レーザスキャナを使った群落構造の垂直分布の計測も行われている。Radtke and Bolstad (2001) は、林床から真上に向けて発射したレーザ光線が樹冠を通過する確率から Gap Fraction を測定し、MacArthur and Horn (1969) の方法によって群落構造の垂直分布を求めた。また、Lefsky *et al.* (1999) は、Foot-Print の大きなレーザ光線を利用し、反射パルスの大きさと時間から群落構造の垂直分布を測定した。レーザ光線を利用したこれらの方法によって、群落構造の垂直分布を測定することができるようになったが、実際の森林では垂直方向だけでなく、水平方向にも不均一な分布を持っており、CO₂ 固定量の推定やリモートセンシングの解析を精度良く行うためには、PAD や APIA の三次元的な分布を測定する必要がある。

そこで本研究では、PAD と APIA の三次元的な分布を測定するため、レーザスキャナを使った新しい手法の開発を行った。また、本論文で提案するレーザスキャナを用いた手法の有効性を検証するため、層別刈り取り法を用いて葉面積の垂直分布を測定し、レーザスキャナで測定した結果との比較を行った。

2. 測定原理

2.1 Gap Fraction の三次元分布

レーザスキャナとは、本体を回転、あるいは移動させながら高速高密度でレーザ光線を発射し、レーザ光線が遮断された点の三次元座標の集まり (点群) として、測定対象の表面形状を測定する装置である。レーザ光線が遮断された点の三次元座標は、レーザスキャナから発射されたレーザ光線が測定対象に当たって反射され、再び本体に戻ってくるまでの時間から計算される距離と、レーザ光線が発射された方位角、および天頂角から計算される。もし、レーザ光線の進路上にレーザ光線を遮断する測定対象がなかった場合には通過したと判断される。

したがって、レーザスキャナを使って Gap Fraction を測定する場合には、レーザ光線の天頂角を変えながら樹冠に向けてレーザ光線を発射し、発射したレーザ光線の総数に対して、レーザ光線が樹冠を通過した本数を割

合として求めれば良い。さらに、レーザスキャナを使用することで、レーザ光線が植物体によって遮断された点の三次元座標が求まるため、森林内のある空間に入射したレーザ光線の数と、その空間を通過したレーザ光線の数の割合を求めることで、その空間の **Gap Fraction** を推定することが可能となる。本研究では、森林を高さ方向と水平方向に分割してできるセルの三次元配列で表現し、各セルに対して **Gap Fraction** を測定することで **PAD** と **APIA** を推定する。以下に、森林を分割してできるセルの **Gap Fraction** を計算する方法について述べる。

Fig. 1 は、セルにおけるレーザ光線の通過と遮断の過程を模式的に表した図である。なお、Fig. 1 では話を簡単にするため、セルの奥行きは無視して示している。**Gap Fraction** の計算には式 (2) を用いるが、式 (2) は群落は水平方向に無限に広がっているという仮定のもとで成立する。この仮定のもとでは、群落を通過する全てのレーザ光線は、式 (2) における h が同じ値となる。しかし、森林を分割してできるセルに対して **Gap Fraction** を計算しようとした場合、Fig. 1 の光線 (a) のようにセルの側面から入射するレーザ光線や、光線 (d) のようにセルの側面から出射するレーザ光線があるため、式 (2) における h がレーザ光線ごとに変わってしまい、セルの **Gap Fraction** を正しく計算することができない。そこで、以下に示す手順でセルにおける **Gap Fraction** を計算した。

Fig. 1 のように、セルの下面高さを h_1 、上面高さを h_2 とし、レーザ光線の天頂角を θ としたとき、 h_1 と h_2 の間の水平な層で葉や木部の分布が均一だと仮定すると、**Gap Fraction** は次の式で表すことができる。

$$P(\theta, h_1, h_2) = \exp\{-\mu(h_2 - h_1)G(\theta)/\cos\theta\} \quad (3)$$

Fig. 1. Penetration patterns of laser beam through the cell.

次に、 h_1 と h_2 で挟まれた層を n 個の薄い層に分割したとき、もとの層の **Gap Fraction** は分割した各層の **Gap Fraction** の積和として次の式で表すことができる。

$$P(\theta, h_1, h_2) = \prod_{i=1}^n \exp\{-\mu z_i G(\theta)/\cos\theta\} \\ = \prod_{i=1}^n P_i(\theta, z_i) \quad (4)$$

ただし、 z_i は h_1 と h_2 で挟まれた層を分割してできる各層の厚さであり、次の式が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^n z_i = h_2 - h_1 \quad (5)$$

ここで、層の分割数 n を大きく（すなわち、分割してできる各層の厚さを小さく）することで、**Gap Fraction** を求めようとしている空間の側面からレーザ光線の入射と出射をなくし、分割した薄い層内でレーザ光線の遮断が2回以上起こらないようにする。その結果、レーザ光線の遮断がない層とある層で、**Gap Fraction** はそれぞれ次の式で与えられる。

$$P_i(\theta, z_i) = \begin{cases} 1 & \text{遮断なし} \\ (m_i - 1)/m_i & \text{遮断あり} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 m_i は z_i の層に入射した光線の本数である。Fig. 1 の例では、 z_j 層ではレーザ光線の遮断がないため **Gap Fraction** は1となるが、 z_i 層ではレーザ光線 (c) だけが遮断されるため、 z_i 層の下面から入射したレーザ光線の数 (m_i) に対する上面から出射したレーザ光線の数 ($m_i - 1$) の割合として **Gap Fraction** を計算できる。

以上のように、式 (4) と式 (6) から森林内のある空間における **Gap Fraction** を求めることができ、最終的に森林の **PAD** と **APIA** の三次元分布を計算することができる。

2.2 LAD と ALIA の計算

レーザスキャナを使って測定した **Gap Fraction** から求まるのは葉と木部を合わせた **PAD** であるが、 CO_2 固定量の推定に利用する場合には、葉の面積密度である **LAD** が重要である。そこで、**PAD** から **LAD** を求めるため、落葉して木部だけの状態にある群落で **Gap Fraction** の測定を行い、木部面積密度 (**WAD: Wood Area Density**) を測定しておき、**PAD** と **WAD** の差をとることで **LAD** を計算した。

$$\text{LAD} = \text{PAD} - \text{WAD} \quad (7)$$

また、**ALIA** を次の式から計算した。

$$\text{ALIA} = \frac{\text{PAD} \cdot \text{APIA} - \text{WAD} \cdot \text{AWIA}}{\text{LAD}} \quad (8)$$

Fig. 2. Scheme of the experimental site.

ただし、AWIA は木部の平均傾斜角 (Average Wood Inclination Angle) である。

3. 実験方法

本研究では、レーザスキャナを用いた群落構造の測定手法の開発と検証を目的としており、森林の生育条件が単純で刈り取り調査が容易に行えるように、国立環境研究所の生態系研究フィールド (茨城県つくば市八幡台: 北緯 $36^{\circ}02'55''$, 東経 $140^{\circ}04'52''$) で栽培・管理している 5 年生のニホンカラマツ (*Larix kaempferi* Sarg.) の群落で測定を行った。ニホンカラマツは、北海道から東北まで広く植林されており、同じカラマツ属はアジア・ユーラシアの広い範囲に分布する北方林の代表的な樹種である。

生態系研究フィールドのカラマツは平均樹高が約 5 m で、 $18\text{ m} \times 18\text{ m}$ の平坦な土地に株間間隔 2 m で 100 (10×10) 本栽培されている。カラマツの群落は、2002 年の 10 月に 75% の間引きを行い、また 2003 年の 1 月に地面から 1 m までの高さで枝打ちを行った。個体の形状は円錐形に近い形をしており、個体間には Gap がみられ、完全に密閉された状態ではなかった。

以下に、レーザスキャナを使った測定と層別刈り取り法による測定の詳細を述べる。

3.1 レーザスキャナによる方法

実験に使用したレーザスキャナは、距離のみ測定可能なレーザ距離センサ (LD90-3100HS, Riegl) を回転ステージ (ARS-936-HP, 中央精機) に取り付け、さらにレーザ距離センサを取り付けた回転ステージをもう 1 台の回転ステージ (ARS-136-HP, 中央精機) に垂直に取り付けることで、レーザ光線の天頂角と方位角を測定できるように自作した。使用したレーザ距離センサは、レーザ光線の波長が 970 nm, レーザ光線の広がり角が

3 mrad のものを使用した。

Fig. 2 に実験の概念図を示す。実験を行った区画は、カラマツ群落の東端から 5 列目までの 50 個体を対象に行った。レーザスキャナは、隣接する 4 個体の中央に設置し、36 (9×4) 点で測定を行った。各測定点において、レーザ光線の原点が地面から 40 cm の高さになるようにレーザスキャナを設置した。レーザ光線の発射角度は、天頂角について 10° から 70° まで 5° 間隔で 13 段階、方位角について 0° から 360° まで 0.4° 間隔で 900 段階となるように設定し、1 回の測定で 11,700 本のレーザ光線を発射した。1 地点の測定に要する時間は約 15 分間で、36 点全て測定するのに 2 日間を必要とした。

PAD と APIA の空間分布の計算は、レーザスキャナを設置した点を中心とする $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ の水平区画について、高さ方向に 0.5 m の層で分割してできる各セルに対して行った。したがって、36 個の水平区画における PAD と APIA の垂直分布を計算で求めることができる。ただし、地面に一番近い層については、地面から 1 m までを 1 つの層として計算を行った。PAD と APIA の計算には、Norman and Campbell (1989) の方法を用いた。Norman and Campbell (1989) の方法を用いる場合、Gap Fraction をレーザ光線の天頂角でクラス分けする必要がある。本研究では、天頂角を 10° から 25° , 30° から 50° , 55° から 70° の 3 つのクラスに分け、それぞれの天頂角クラスについて Gap Fraction を計算することで PAD と APIA を求めた。

実験は、カラマツの葉が十分に繁茂している 2003 年 10 月 9 日、10 日に PAD と APIA を測定し、カラマツの葉が完全に落葉していた 2004 年 3 月 11 日、12 日に同じ場所で WAD と AWIA を測定した。2003 年 10 月の時点でカラマツの木部の伸長はみられなかったもので、2003 年 10 月と 2004 年 3 月で WAD は変化していないとみなすことができ、2003 年 10 月に測定した PAD と 2004 年 3 月に測定した WAD の差をとることで LAD を計算した。

3.2 層別刈り取り法

レーザスキャナで PAD を測定した直後の 2003 年 10 月 12 日に、層別刈り取り法による LAD の測定を行った。測定は、レーザスキャナによる測定区画から 1 列あいだをおいて、カラマツ群落の東端から 7 列目と 8 列目に栽培されている個体のなかで生育が一樣な 3 個体を使用し、地面から 0.5 m ごとの層に分割して刈り取りを行った。ただし、地面に一番近い層については、レーザスキャナによる測定と合わせるため、地面から 1 m までをまとめて 1 つの層として測定を行った。層別に刈り取ったカラマツは、葉と木部に分離し、葉のみを

Fig. 3. Profile of specific leaf area. Solid line is regression line.

80℃で24時間乾燥させて乾物重量を測定した。次に、カラマツの葉の乾物重量と面積の関係である比葉面積 (SLA: Specific Leaf Area) を求めるため、刈り取り調査を行った個体から、それぞれの層ごとにカラマツの葉をサンプリングし、スキャナで読み込んで面積を測定した後、80℃で24時間乾燥させて乾物重量を測定した。

4. 結果と考察

Fig. 3に、高さ別にサンプリングして求めたSLAを示す。ただし、1 m以下と4.5 m以上の層についてはサンプル数が少なかったため測定を行わなかった。SLAは、1 mから1.5 mの間の層がもっとも大きく153.2 cm²/g、4 mから4.5 mの間の層がもっとも小さく91.8 cm²/gとなり、群落の下層よりも上層の方が小さくなる傾向を示した。これは、群落の下層の葉は薄く、上層の葉は厚いことを意味している。

高さによってSLAが異なるのは、群落内の光環境の違い (Chen and Klinka, 1998) や、葉が着生する高さでの水ポテンシャルの違い (Marshall and Monserud, 2003) が原因だと考えられている。SLAの値については、Kurachi *et al.* (1992) が本研究と同じニホンカラマツを対象に測定を行い、樹高が5.3 mから11.3 mと高くなるにしたがってSLAが200 cm²/gから100 cm²/gへ減少すると報告しており、本研究で得られたSLAは妥当な値であると判断し、以下に述べるLADの計算に使用した。

Fig. 4に、層別刈り取り法で測定したLADと本手法で測定したLAD (Fig. 4 (a)), およびPAD (Fig. 4 (b)) の関係を示す。層別刈り取り法によるLADは、層ごとに刈り取った葉の乾物重量をFig. 3で得られたSLAを用いて面積に変換し、これを層の厚さで割ることで求めた。また、本手法によるLADとPADは、36区画で得られた層別のLADとPADを、同じ高さの層

Fig. 4. Comparison of LAD measured by stratified clipping method with (a) LAD and (b) PAD measured with laser scanner. Solid line represents 1:1 line.

について平均することで求めた。Fig. 4 (a) から、層別刈り取り法によるLADと本手法によるLADの間には、決定係数が0.94と高い相関がみられ、回帰式の傾きも小数点以下2桁の精度で1.00となり、実際のLADを精度良く測定できていることが分かった。一方、層別刈り取り法によるLADと本手法によるPADの関係をみると、決定係数は0.98と高かったが、回帰式の傾きが1.98となり、本手法によるPADは層別刈り取り法によるLADの約2倍となった。そこで、層別刈り取り法とほぼ1対1の関係が得られた、本手法によるLADを使ってカラマツ群落の垂直分布を計算したのがFig. 5である。Fig. 5に示したエラーバーは、36個の区画でLADを平均したときの標準偏差である。同時に、層別刈り取り法で測定したLADの垂直分布も示す。両方の測定方法とも1 mから2 mの間でLADが最大となり、上層に向かってLADが減少する分布を示し、実際に圃場でみられた円錐形のカラマツの個体形状を良く再現していた。ただし、本手法で測定したLADには区画ごとに大きなばらつきがみられ、葉の空間的な不均一性を示唆するものと考えられた。そこでFig. 6に、カラマツ群

Fig. 5. Profile of leaf area density measured by laser scanner (●) and stratified clipping method (○). Error bar represents standard deviation.

落における LAD の三次元分布を示した。LAD に関しては、カラマツ群落を水平方向と垂直方向に分割してできるセルの三次元配列として測定しており、Fig. 6 の (a), (b), (c), (d) はそれぞれ、Fig. 2 の a 列と b 列、b 列と c 列、c 列と d 列、d 列と e 列の間の LAD の分布を示している。なお、Fig. 6 は、セル単位で得られた不連続な LAD の分布をスプライン補間によって連続的な変化として表している。Fig. 5 で見られたように、1 m から 2 m の間に葉が多く分布し、高さ方向に階層的な構造を持っていることが分かるが、群落の上層に葉が密に分布している場所がみられるなど、葉の三次元的な分布を再現できていることが分かる。

一般に、LAI-2000 や全天空画像などの方法で Gap Fraction から計算した PAD は、刈り取り調査やリタートラップなどの直接的な測定で得られた LAD に比べて過小に推定される傾向がある (Gower and Norman, 1991)。本研究で提案した方法も、Gap Fraction から PAD を計算しており、過去の研究例から推察すると層別刈り取り法による LAD を過小に推定する

ことが予想された。しかし実際には、本手法で測定した PAD は層別刈り取り法で求めた LAD の約 2 倍という結果になった。Gap Fraction から計算した PAD が実際の LAD と比べて低く推定される原因は、葉の分布が空間的に均一ではなく、枝の周りに局所的に分布することによって Gap Fraction を過大評価するためだと考えられている。一方、Deblonde *et al.* (1994) は、幹や枝の面積比率が大きいときに、Gap Fraction から計算した PAD が実際の LAD より高く推定されると報告している。また、Smolander and Stenberg (1996) や Stenberg *et al.* (2003) は段階的に枝を刈り取りながら PAD を測定する実験を行い、幹と枝を合わせた木部面積の割合が増加するにしたがって実測した PAD が LAI-2000 で測定した PAD に近づいていくことを示した。本研究では、木部の表面積を直接測定していないが、落葉期に本手法で測定した WAD が着葉期に測定した PAD の 50% 近くとなっており、かなり大きな割合であったと考えられる。そのため、着葉期に測定した PAD には幹や枝の木部面積がかなり含まれていたと考えられ、そのことが、層別刈り取りによる LAD よりも本手法による PAD の方が高く推定された原因の 1 つと考えられる。もう 1 つの原因として、レーザ光線のビーム径による Gap Fraction の過小評価が考えられる。Caldwell *et al.* (1983) は、Gap Fraction の測定に用いる光線の径が大きくなるほど PAD が高く推定されることを示した。本研究で使用したレーザスキャナのビーム径は、天頂角 70° で発射したときに樹高と同じ 5 m の高さで約 4.4 cm となり、カラマツの針葉のようにビーム径に比べて細い葉では、針葉と針葉の間の Gap を検出することができずに葉の面積を低く推定してしまう可能性がある。

本手法から得られた層別の PAD には、葉の分布の不均一性とレーザスキャナのビーム径による両方の影響が含まれていると考えられ、今後 LAD の推定を行っていくうえで、これらの影響をそれぞれ定量的に評価することが重要な課題であると考えている。

測定原理で述べたように、Gap Fraction の式を解くことによって PAD だけでなく APIA も計算することができる。レーザスキャナを使った測定でも、カラマツ群落を分割してできる各セルごとに APIA を計算することが可能である。しかし、APIA はレーザ光線の通過率のわずかな差で大きく変動するため、セル単位で計算した場合に APIA の値に明らかな異常値がみられる (例えば、APIA が 0° 以下や 90° 以上)。そこで、APIA は高さ方向で変化しないと仮定し、36 区画に対して計算を行った。Table 1 に、36 区画で計算した APIA、

AWIA, ALIA の平均と標準偏差を示す。同時に、各区画において PAD, WAD, LAD をそれぞれ高さ方向に積分して得られる PAI (Plant Area Index), WAI (Wood Area Index), LAI (Leaf Area Index) の平均と標準偏差も示す。AWIA の平均は 68.4° となり、垂直に近いことが分かった。このことから、本研究で対象としたカラマツ群落では、レーザ光線の遮断における幹の寄与が枝よりも大きかったと考えられる。また、ALIA の平均をみると 57.5° となり、AWIA の 68.4° との比較から、枝に対してより水平に近い角度で葉が着生することが分かった。

5. ま と め

本研究では、5 年生のカラマツ群落を対象に、レーザスキャナを使って群落構造の三次元分布を測定する手法の開発を行った。測定結果は、層別刈り取り法によって測定した LAD の垂直分布と比較することで検証した。

レーザスキャナを使って着葉期の PAD と落葉期の WAD を測定し、PAD と WAD の差から求めた LAD は、層別刈り取り法で測定した LAD と高い相関を示し、本研究で提案した測定手法が正しいことを実証した。さらに、カラマツ群落を水平方向と垂直方向に分割

Fig. 6. Spatial distribution of leaf area density shown in section between row (a) a and b, (b) b and c, (c) c and d, (d) d and e (see in Fig. 1).

Table 1. Summary of laser scanner measurements for area density and inclination angle of plant, wood and leaf.

	Area index (m ² /m ²)			Inclination angle (degree)		
	PAI	WAI	LAI	APIA	AWIA	ALIA
Average	4.4	2.1	2.3	63.5	68.4	57.5
Standard deviation	0.9	0.3	0.7	6.6	5.2	13.5

してできるセルの三次元配列として求め、各セルごとに LAD を計算することで、LAD の垂直分布だけでなく水平方向の分布も再現することができた。また、葉の平均傾斜角である ALIA も計算することができた。今後は、LAD の計算における葉や木部の不均一性と、レーザ光線のビーム径による影響を評価していくことが重要な課題と考えている。

本研究で提案したレーザスキャナによる群落構造の測定方法は、LAI-2000 や全天空画像を用いた従来の方法と比較して、林床からの測定だけで群落の三次元構造を測定することが可能であり、夜間の測定も可能であるなどの利点がある。

本研究では、林床にレーザスキャナを設置して測定を行ったが、原理的にレーザ光線が樹冠を通過する確率が分かれば良いため、森林の上空からレーザ光線を発射することでも群落構造の測定が可能である。したがって、航空機やヘリコプタに搭載したレーザスキャナによる測定を行えば広域での測定が可能となり、より大きなスケールの森林に対して本手法を適用できる可能性がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、実験圃場のカラマツ群落を栽培管理をしていただいた鈴木義男氏をはじめとする国立環境研究所生態系研究フィールドの皆様深く感謝いたします。

References

- Aber, J. D., 1979: A method for estimating foliage-height profiles in broad-leaved forests. *J. Ecol.*, **67**, 35–40.
- Caldwell, M. M., Harris, G. W. and Dzurec, R. S., 1983: A fiber optic point quadrat system for improved accuracy in vegetation sampling. *Oecologia*, **59**, 417–418.
- Chen, H. Y. H. and Klinka, K., 1998: Survival, growth, and allometry of planted *Larix occidentalis* seedlings in relation to light availability. *For. Ecol. Manage.*, **106**, 169–179.
- Deblonde, G., Penner, M. and Royer, A., 1994: Measuring leaf area index with the LI-COR LAI-2000 in pine stands. *Ecology*, **75**, 1507–1511.

- Gower, S. T. and Norman, J. M., 1991: Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology*, **72**, 1896–1900.
- Kurachi, N., Hagihara, A. and Hozumi, K., 1992: Canopy photosynthetic production in a Japanese larch stand. I. Seasonal and vertical changes of leaf characteristics along the light gradient in a canopy. *Ecol. Res.*, **7**, 255–265.
- Kurachi, N., Hagihara, A. and Hozumi, K., 1993: Canopy photosynthetic production in a Japanese larch forest. II. Estimation of the canopy photosynthetic production. *Ecol. Res.*, **8**, 349–361.
- Kuusk, A., 1995: A fast, invertible canopy reflectance model. *Remote Sensing Environ.*, **51**, 342–350.
- Lang, A. R. G., 1986: Leaf area and average leaf angle from transmission of direct sunlight. *Aust. J. Bot.*, **36**, 349–355.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. and Harding, D., 1999: Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing Environ.*, **70**, 339–361.
- MacArthur, R. H. and Horn, H. S., 1969: Foliage profile by vertical measurements. *Ecology*, **50**, 802–804.
- Marshall, J. D. and Monserud, R. A., 2003: Foliage height influences specific leaf area of three conifer species. *Can. J. For. Res.*, **33**, 164–170.
- Miller, J. B., 1967: A formula for average foliage density. *Aust. J. Bot.*, **15**, 141–144.
- Morrison, I. K., 1991: Effect of trap dimensions on mass of litterfall collected in an *Acer saccharum* stand in northern Ontario. *Can. J. For. Res.*, **21**, 939–941.
- Myneni, R. B., Maggion, S., Jaquinta, J., Privette, J. L., Gobron, N., Pinty, B., Kimes, D. S., Verstraete, M. M. and Williams, D. L., 1995: Optical remote sensing of vegetation: Modeling, caveats, and algorithms. *Remote Sensing Environ.*, **51**, 169–188.
- Norman, J. M. and Campbell, G. S., 1989: Canopy structure. In *Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation* (eds. by Percy, R. W., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A. and Rudel, P. W.). Chapman and Hall, London, pp. 301–325.
- Omasa, K., Urano, Y., Oguma, H. and Fujinuma,

- Y., 2002: Mapping of tree position of *Larix leptolepis* woods and estimation of diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar. *J. Remote Sensing Soc. Jpn.*, **22**, 550-557 (大政謙次・浦野 豊・小熊宏之・藤沼康実, 2002: 可搬型 Scanning Lidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定. 日本リモートセンシング学会誌, **22**, 550-557).
- Radtke, P. J. and Bolstad, P. V., 2001: Laser point-quadrat sampling for estimating foliage-height profiles in broad-leaved forests. *Can. J. For. Res.*, **31**, 410-418.
- Rich, P. M., 1990: Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Environ.*, **5**, 13-29.
- Running, S. W. and Coughlan, J. C., 1988: A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecol. Model.*, **42**, 125-154.
- Smith, F. W., Sampson, D. A. and Long, J. N., 1991: Comparison of leaf area index estimates from tree allometrics and measured light interception. *For. Sci.*, **37**, 1682-1688.
- Smolander, H. and Stenberg, P., 1996: Response of LAI-2000 estimates to changes in plant surface area index in a Scots pine stand. *Tree Physiol.*, **16**, 345-349.
- Stenberg, P., Nilson, T., Smolander, H. and Voipio, P., 2003: Gap fraction based estimation of LAI in Scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. *Can. J. Remote Sensing*, **29**, 363-370.
- Utsugi, H., Araki, M., Kawasaki, T. and Ishizuka, M., 2001: Estimation of seasonal change in leaf area index for a *Chamaecyparis obtusa* stand. *J. Jpn. For. Soc.*, **83**, 359-362 (宇都木玄・荒木眞岳・川崎達郎・石塚森吉, 2001: ヒノキ人工林における葉面積指数の季節変化の推定. 日本林学会誌, **83**, 359-362).
- Verhoef, W., 1984: Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing Environ.*, **16**, 125-141.
- Welles, J. M. and Norman, J. M., 1991: Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.*, **83**, 818-825.
- Wilson, J. W., 1960: Inclined point quadrats. *New Phytol.*, **59**, 1-8.
- Yamamoto, H., Suzuki, Y. and Hayakawa, S., 1995: Estimation of leaf area index in crop canopies using plant canopy analyzer. *Jpn. J. Crop Sci.*, **64**, 333-335 (山本晴彦・鈴木義則・早川誠而, 1995: プラントキャノピーアナライザーを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. 日本作物学会紀事, **64**, 333-335).
- Yone, Y., Oguma, H. and Yamagata, Y., 2002: Development of measurement system for the carbon sinks under the Kyoto Protocol—Measurement of stem volume and carbon weight of *Larix leptolepis* stand by airborne lidar—. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.*, **22**, 531-543 (米 康充・小熊宏之・山形与志樹, 2002: 京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発—航空機 Lidar によるカラマツ林の樹冠計測と材積・炭素重量計測精度の検証—. 日本リモートセンシング学会誌, **22**, 531-543).
- Yone, Y., Oguma, H. and Yamagata, Y., 2003: Development of measurement system for the carbon sinks under the Kyoto Protocol—Measurement of 3D imaging sensor data using the method of cylinder reconstruction model from range points. *Jpn. J. For. Plann.*, **37**, 21-30 (米 康充・小熊宏之・山形与志樹, 2003: 京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発—地上レーザスキャナによる点群モデルを用いた計測手法の検討—. 森林計画学会誌, **37**, 21-30).