

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

大政謙次*¹・浦野 豊*¹・小熊宏之*²・藤沼康実*²

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

Kenji OMASA*¹, Yutaka URANO*¹, Hiroyuki OGUMA*² and Yasumi FUJINUMA*²

Abstract

In natural woody conditions, measuring tree position and diameter at breast height (DBH) of each *Larix leptolepis* by a portable scanning lidar is not easy because the tree is covered with not only their own thick branches but also other plants such as small broad-leaved trees, vines, epiphytes and quite tall ferns. Therefore, new methods for mapping tree position of *Larix leptolepis* woods and estimating the DBH using the range data of measurable tree parts obtained by a portable scanning lidar with high spatial resolution were examined. Furthermore, biomass of the trees was estimated from the DBH.

Using the range data measured by the portable scanning lidar that was set at a point in the woods, each tree position was mapped. Within the area of the angle of 170 degrees horizontally and 10m from the lidar, the number of measurable trees was 14 (100% of all trees in the area), within the area of 15m the number was 24 (83%), within the area of 20m the number was 29 (66%), and within the area of 30m the number was 44 (45%). Then the DBH of each tree was estimated in error of RMSE=7.3mm from the trunk diameter measured at a certain height of the tree using Eq. (1), where the coefficient $k(h)$ had been obtained beforehand. Also, the biomass (fresh, dry and carbon weight) of each tree was estimated from the DBH using a quadratic equation ($R^2=0.96$) correlated between DBH and biomass above ground. Furthermore, the biomass per square meter was estimated in error of 2.7% within the area of 30m from the lidar. The fresh weight and the carbon weight were obtained from the dry weight multiplied by 1.7 and 0.45 respectively.

Keywords : biomass, carbon sink, diameter at breast height (DBH), portable scanning lidar, tree position

1. はじめに

森林生態系の保全や地球温暖化の問題に関連して、森林の構造やバイオマスを精度よく推定することが必要とされる^{1)~5)}。特に、京都議定書の締結に向けて、森林破壊や植林活動などによる森林の炭素吸収量の変化を正確に評価するための手法の確立が急務とされる^{4),5)}。このため、リモートセンシングと地上での生態学的な調査やフラックス測定ネットワークなどを統合した研究が盛んに行われるようになってきた^{4),5)}。

森林の構造や炭素吸収量推定のためのバイオマスを求めるために、航空写真測量や SAR (Synthetic Aperture Radar),

Landsat TM (Thematic Mapper) などを利用したリモートセンシングの研究が行われている^{6)~9)}。これらは、広域の情報を得るには適しているが、精度の点で問題があった。最近、航空機搭載の Scanning Lidar による森林のリモートセンシングが行われるようになり、森林の3次元構造やバイオマスがより正確に得られるようになってきた^{10)~17)}。

一方、リモートセンシングデータの解析のためには、地上調査による裏付けが必要である。地上調査により正確な森林構造やバイオマスを求めるには、樹木の器官毎のバイオマスや層別のバイオマスを測定することが必要であるが、このためには多大な時間と労力を必要とする。このため、樹木を対象とした地上調査では、ごく限られた範囲で前もってバイオマスと胸高直径の関係を求めておき、比較

(2002.2.14 受付, 2002.8.5 改訂受理)

*¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科
〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

*² 国立環境研究所地球環境研究センター
〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

*¹ Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo 113-8657, Japan

*² Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

的測定が容易な胸高直径からバイオマスを推定する手法が一般に用いられてきた⁶⁾。しかし、林床に多くの草木が繁茂する自然の状態の森林では、胸高直径の測定を行うにも多大な労力を必要とし、また、調査により、林床を踏み荒らすという問題があった。

このようなことから、最近、地上調査にも、可搬型の Scanning Lidar (Range Finder) を用い、樹木の 3 次元構造を計測することが行われるようになってきた^{15), 18)~21)}。林ら¹⁵⁾は、この装置を林床植物がなく、また、樹木の下枝が枝打ちされた、平坦で見通しのきく場所での胸高直径の計測に使用した。しかし、この手法は、林床植物や下枝があって見通しのあまりきかない自然の状態の樹林には適用できなかった。また、使用した装置の精度が低かったため計測誤差が RMSE=45 mm と大きく、精度の点で問題が残った。さらに、樹木位置のマッピングやバイオマスの推定は行われていなかった。

そこで、本研究では、手前の木の小枝や広葉樹、あるいは林床植物などで遮られて見通しのあまりきかない自然の状態の樹林を対象として、より精度の高い可搬型の Scanning Lidar を用いて森林内部を 3 次元計測し、胸高直径を求める手法について検討した。そして、個々の樹木位置のマッピングとバイオマス (生重量、乾物重量、炭素重量) の推定を行った。

2. 対象地域と方法

2.1 対象地域と既存生態調査データ

対象地域として、北海道苫小牧市にある国立環境研究所の落葉針葉樹林 (カラマツ (*Larix leptolepis*) 人工林) の生態系調査区 (北緯 42°44'20" 東経 141°31'30.0", 100×100 m²) を選び、可搬型 Scanning Lidar (以下“可搬型 SL”と略す) による計測を、比較的林床植物の多く茂る初秋の 2001 年 10 月初旬に実施した。

一方、調査区内の植生は、2000 年 9 月下旬に行われた毎木調査 (胸高直径が 50 mm 以上の樹木を対象としたが、カラマツは、全て 50 mm 以上であった) によって明らかにされている。この毎木調査では、調査区内に 601 本のカラマツ (個体数で約 60%) の他、16 本のエゾマツ (個体数で約 2%) や 407 本の各種の広葉樹が存在し、合計 1,024 本の樹木が生育していることが確認された。また、林床植物はシダ類が優占し、他にササ類が存在していた。なお、調査区内の地面はほぼ平坦であった。

上記の毎木調査では、落葉針葉樹林内のカラマツ 10 本を伐採し、対象樹木の胸高直径 (高さ 1.2 m) と樹高の他、地上部のバイオマス (生重量、乾物重量) が測定されている。

2.2 計測装置および計測方法

計測は、調査区に可搬型 SL を設置して行った。この可搬型 SL (RIEGL LPM-25HA) の性能は、計測範囲が 2 m~60 m、計測の距離精度が ±8 mm、水平、垂直方向の角

度分解能が ±0.009 度であった。また、樹幹計測の精度をあげるために、樹幹へのレーザーの到達度が高くなるラストパルスモードで計測した。その際のレーザーのフットプリントは 20 m 離れた地点で直径約 20 mm であった。

最初に、胸高直径と任意の高さにおける樹幹直径との関係を調べるために、生態系調査区内において、胸高直径が 60 mm~290 mm のカラマツ 11 本を選定し、幹足上部から樹冠下部までが計測可能な位置に可搬型 SL を設置して、高さ 0.5 m 以上の樹幹を 0.1 m 毎に計測した。

次に、調査区内の一般の樹木を対象として、可搬型 SL を用いた計測を行った。その際、可搬型 SL の設置位置は、できるだけ多くの樹木が認識できる場所を選び、設置位置を中心として、水平および垂直方向の角度範囲をスキャンし、距離画像データを得た。しかし、手前の木の小枝や林床植物などで遮られて、計測対象とした樹木の多くは胸高位置の計測が難しかった。なお、計測の際には、対象区内にポールを設置し、地面の傾斜の状態を確認した。

また、可搬型 SL による計測誤差を検証するために、その計測終了後、巻尺を用いて、計測対象範囲 (可搬型 SL を中心とした扇形 (水平方向) の範囲、距離で 10 m, 15 m, 20 m, 30 m の範囲) の全てのカラマツの胸高直径を測定し、その本数を数えた。

2.3 解析方法

可搬型 SL によって計測された距離データから、計測対象とした樹木の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスを推定するための方法を Fig. 1 に示す。以下に具体的な手順について説明する。

(1) 樹幹の直径と中心の推定

可搬型 SL によって計測された距離データ (Fig. 1 (1)) を、付属のソフトウェア (LPMSCAN) により、3 次元空間上の x, y, z 座標に変換した。そして、目的とする高さにおける xy 平面上の計測データを図化し、円弧を抽出した (Fig. 2)。その際、樹幹が直立し、抽出した円弧が正円に近いものだけを選定した。図における円弧周辺の多数の黒点は、可搬型 SL からのレーザー光が樹幹にあたって反射された位置である。これらの黒点で形作られた円弧に内接する正円を作成し、樹幹の直径と中心を求めた (Fig. 1 (2))。

(2) 胸高直径とバイオマスの推定

事前の毎木調査では、個々の樹木の胸高直径と地上部のバイオマスの関係が求められている。このため、胸高直径が得られれば、個々の樹木のバイオマスが推定できる。

手前の木の小枝や広葉樹、あるいは林床植物などで遮られて見通しのあまりきかない自然の状態の樹林を対象として、胸高直径を求めるには、計測可能な高さでの樹幹直径を用いて、胸高直径を推定する必要がある。高さ h (m) における樹幹直径 D (h) (mm) を用いて、胸高直径 DBH (mm) は次式で与えられる。

$$DBH = k(h)(h - 1.2) + D(h) \quad (1)$$

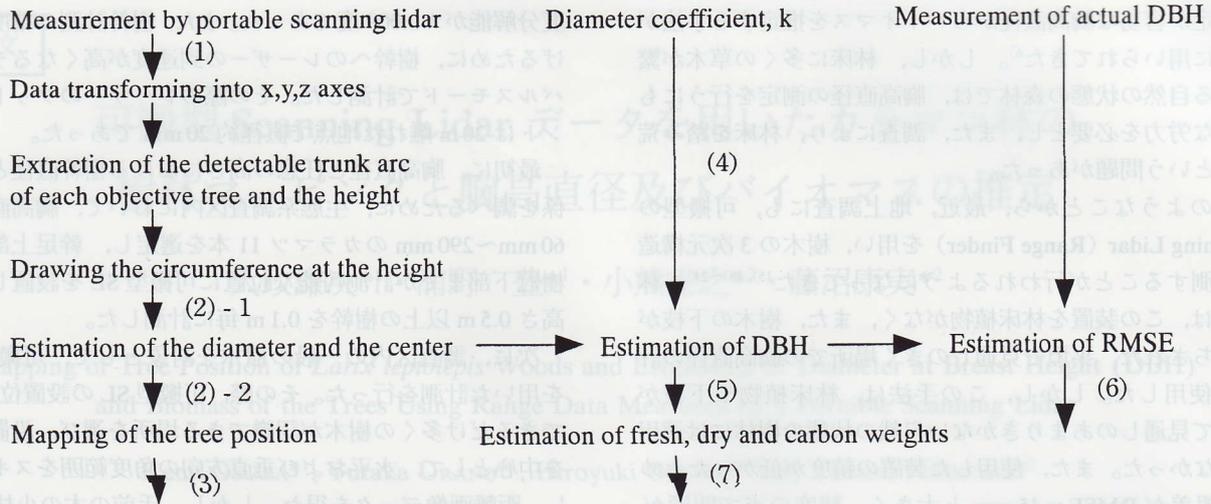


Fig. 1 Flowchart of digital image processing for mapping tree position and estimating diameter at breast height (DBH) and biomass of the trees using range data measured by a portable scanning lidar.

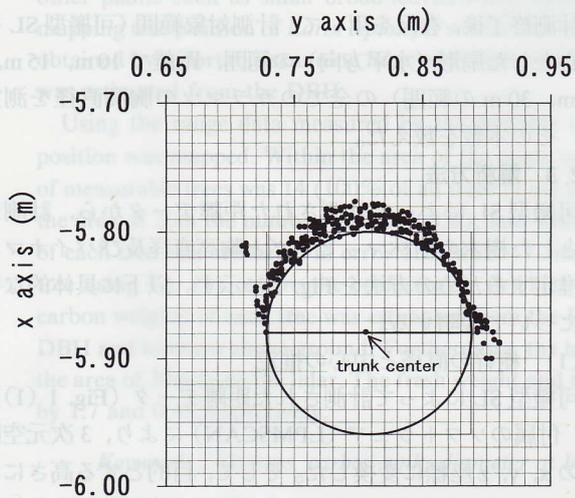


Fig. 2 Conceptual diagram for estimating the diameter and center of tree trunk. Black dots show positions of tree trunk measured by the portable scanning lidar. The diameter and center are obtained by drawing an inscribed circle of dots.

ここで、 $k(h)$ は高さ h における係数である。
 係数 $k(h)$ を前もって求めておけば (Fig. 1 (4)), (1) 式によって胸高直径 DBH が求まり (Fig. 1 (5)), さらに、事前の毎木調査で行われた胸高直径と地上部のバイオマス (生重量, 乾物重量) の関係から、個々のカラマツの生重量および乾物重量が推定できる (Fig. 1 (7))。さらに炭素重量は、樹木の細胞壁を構成する主要成分 (セルロース, ヘミセルロース, リグニン) の化学式から、乾物重量に対する炭素の割合を 45% とした^{22), 23)}。

また、計測対象範囲 (可搬型 SL を中心とした扇形の範囲) に生育するカラマツの中で、可搬型 SL により計測で

きた個々のカラマツのバイオマス (生重量, 乾物重量, 炭素重量) を合計し、これに、可搬型 SL により計測できた本数に対する対象範囲に生育するカラマツの総本数の比を掛けることにより、全カラマツのバイオマスを推定した。そして、単位面積あたりのバイオマスを算出した。このようにして得られた値を、対象範囲において、巻尺により実測した全てのカラマツの胸高直径から算出した単位面積あたりの炭素重量と比較して、誤差評価を行った。

3. 結果及び考察

3.1 樹林マッピング

生態系調査区内での可搬型 SL を用いた樹林の計測結果の例を Fig. 3 に示す。図では、可搬型 SL からの距離が疑似カラーで表示されている。画像における視野は、装置の設置位置を中心に、縦方向が 100° 、横方向が 170° であった。装置の設置位置は、できるだけ多くの樹木が認識できる場所を選んだが、枝葉や林床植物などで、ほとんどの樹木の樹幹が遮られていた。この視野内では、エゾマツはみられず、広葉樹も胸高直径が 50 mm 以下と小さかった。そこで、胸高直径が 50 mm 以上であるカラマツのみを解析対象とした。

Fig. 4 は、Fig. 3 の解析から得られた樹林マッピングの結果である。図は、可搬型 SL の設置点を (0, 0) の原点とした、円弧が抽出できたカラマツ (24 本) と円弧が抽出できなかったカラマツ (20 本) の相対位置を表している。計測対象範囲の毎木調査と比較すると、円弧が抽出できたカラマツは、可搬型 SL の設置位置から 10 m 以内で 64% (計測可能本数=9 本), 15 m 以内で 52% (15 本), 20 m 以内で 39% (17 本), 30 m 以内で 25% (24 本) であった。また、円弧が抽出できなかったものも含めると、10 m 以内で 100% (計測可能本数=14 本), 15 m 以内で 83% (24 本),

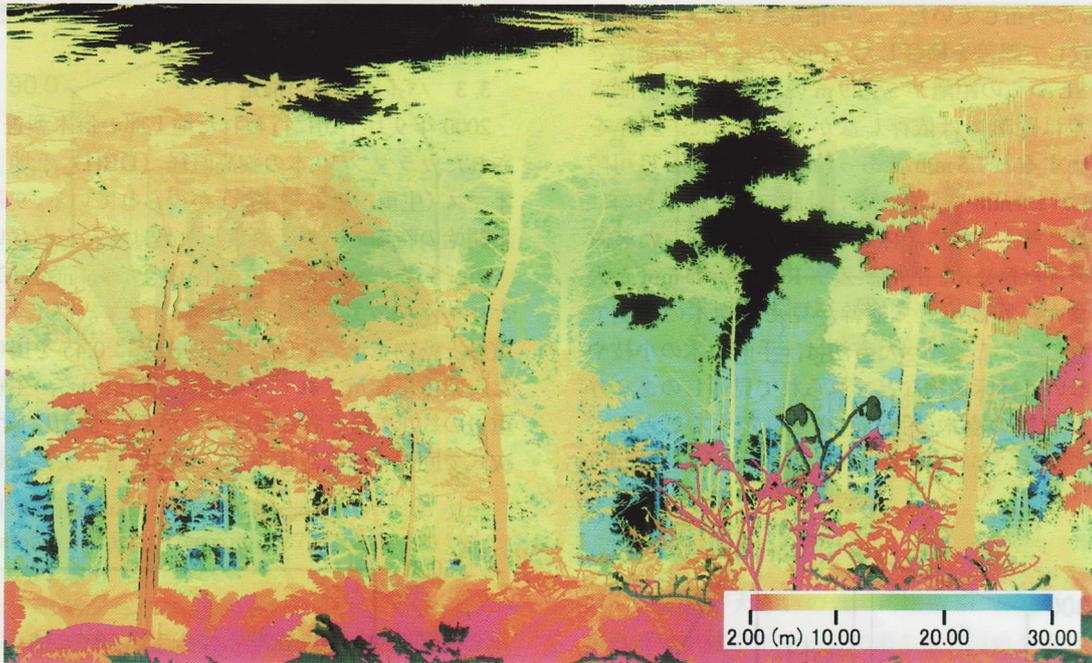


Fig. 3 Range image measured by the portable scanning lidar (see Fig. 1 (1)).

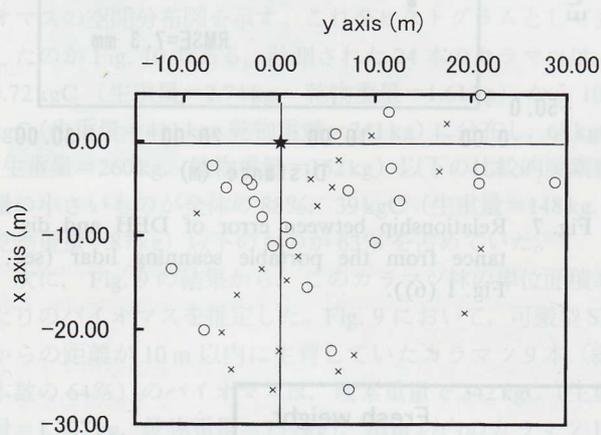


Fig. 4 Tree position map of *Larix leptolepis* woods estimated from range image shown in Fig. 3 (see Fig. 1 (3)).

- : tree position where DBH was measured
- × : approximate tree position where DBH was not measured
- ★ : the origin where the portable scanning lidar was set.

20m 以内で 66% (29 本), 30m 以内で 45% (44 本) であった。この数字をどのように評価するかは意見が分かれると思うが、自然の生育状態で生育している樹木を林床植物の攪乱なしに、一カ所からの計測で求められること、また、踏査では困難な樹木の正確な位置を知ることができるという点で優れている。

3.2 胸高直径の推定と誤差評価

胸高直径は、(1) 式を用いれば、計測可能な高さの樹幹

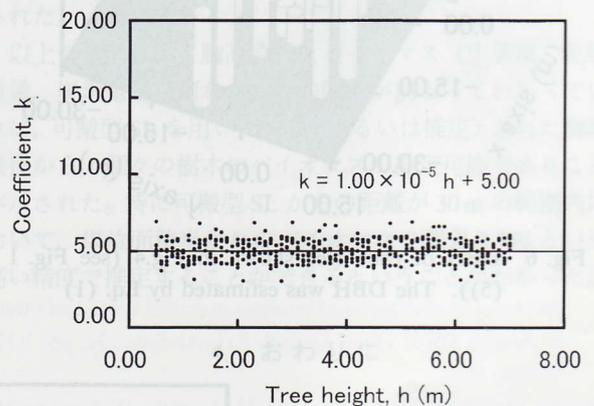


Fig. 5 Relationship between coefficient (k) and tree height (see Fig. 1 (4)).

直径から求められる。その際、係数 $k(h)$ を前もって求めておく必要がある。そこで、同じ生態系調査区内において、幹足上部から樹冠下部まで通して計測可能な樹幹直径が 60~290 mm のカラマツ 11 本を選び、各高さにおける $k(h)$ を求めた (Fig. 5)。その結果、高さがおよそ 0.5~7.0 m の範囲におけるカラマツの $k(h)$ は、樹幹直径や高さにかかわらずほぼ一定であることがわかった。一般には、高さによる樹幹直径の変化は幹曲線式で表されるが⁶⁾、幹足や梢端付近を除いて、対象とする高さ位置の幅が小さい場合には一定と近似できる。

上記で得られた $k(h)$ を用いて、(1) 式により、Fig. 4 に示される円弧の抽出が可能であった 24 本のカラマツの胸高直径を推定した (Fig. 6)。縦軸が、Fig. 4 のそれぞれの位置にあるカラマツの胸高直径を示しており、推定値は 50

から 290 mm に分布していた。この推定された胸高直径を実測値と比較して誤差を検証した (Fig. 7)。今回の測定では、可搬型 SL からの距離が 5~29 m のカラマツが計測されたが、誤差は距離には依存しなかった。また、誤差を RMSE で評価すると 7.3 mm であった。この RMSE は可搬型 SL の精度が ±8 mm であるため、計測データそのものに含まれる誤差と考えられる。林らの報告¹⁵⁾ は使用した装置の精度が低かったために、計測誤差が RMSE=45 mm と大きかった。また、胸高位置で樹幹が見える樹木の計測であった。しかし、ここで述べた方法は、手前の木の小枝や広葉樹、あるいは林床植物などで遮られて見通しのあまりきかない自然状態の樹木の胸高直径を推定することがで

き、精度の点でも RMSE=7.3 mm と飛躍的な改善がみられた。

3.3 バイオマスの推定

2000 年 9 月下旬に行われた地上部の毎木調査では、伐採されたカラマツ 10 本の胸高直径 (DBH) と地上部のバイオマス (生重量と乾物重量) が得られている。9 月下旬は紅葉開始の時期であり、落葉した葉はほとんどない。

Fig. 8 に、このデータから得られた胸高直径 DBH (mm) とバイオマス TB (kg) との関係を示す。バイオマスは、生重量と乾物重量、そして、乾物重量に 0.45 を掛けて算出した炭素重量で示されている。この結果から、生重量は乾物重量の約 1.7 倍であることがわかる。また、胸高直径の 2 次式で回帰すれば、生重量、乾物重量、炭素重量のいずれ

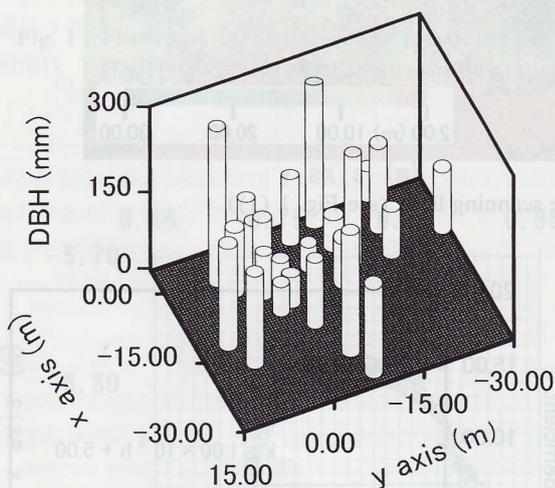


Fig. 6 DBH of each tree shown in Fig.4 (see Fig. 1 (5)). The DBH was estimated by Eq. (1)

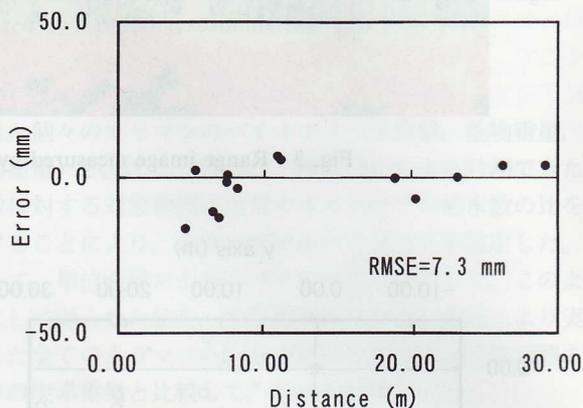


Fig. 7 Relationship between error of DBH and distance from the portable scanning lidar (see Fig. 1 (6)).

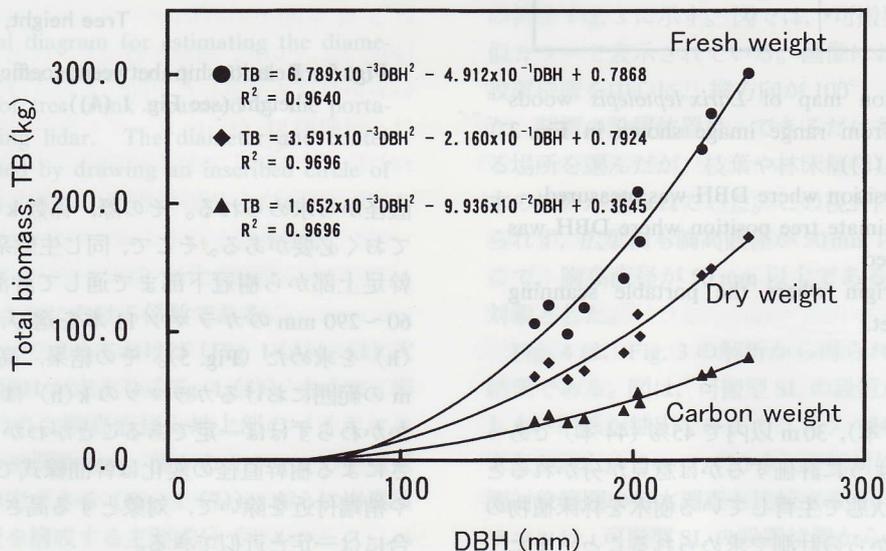


Fig. 8 Relationship between total biomass and DBH.

- : Fresh weight (kg)
- ◆ : Dry weight (kg)
- ▲ : Carbon weight (kgC)

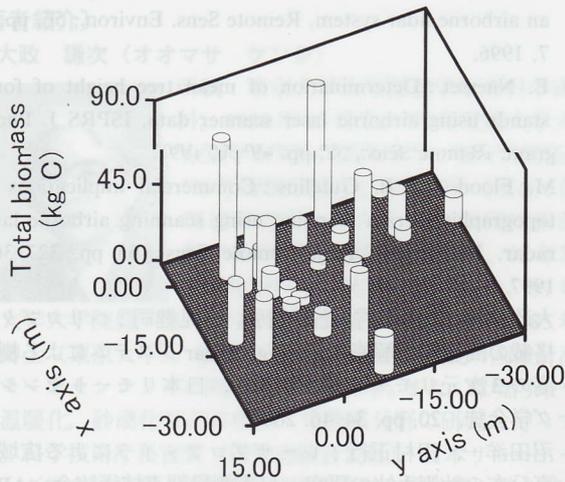


Fig. 9 Total biomass (carbon weight) of each tree shown in Fig. 4 (see Fig. 1 (7)).

の場合にも、 $R^2=0.96$ 以上という非常に高い相関関係を示した。

Fig. 9 には、Fig. 6 で得られた 24 本のカラマツの胸高直径から、図中の式を用いて算出した炭素重量表示でのバイオマスの空間分布図を示す。これをヒストグラムとして表したのが Fig. 10 である。計測された 24 本のカラマツは、0.72 kgC (生重量=2.74 kg, 乾物重量=1.61 kg) から 109 kgC (生重量=411 kg, 乾物重量=241 kg) に分布し、68 kgC (生重量=260 kg, 乾物重量=152 kg) 以下の比較的炭素重量の小さいものが全体の 88%, 39 kgC (生重量=148 kg, 乾物重量=87 kg) 以下のものが 63% を占めていた。

次に、Fig. 9 の結果から、このカラマツ林の単位面積あたりのバイオマスを推定した。Fig. 9 において、可搬型 SL からの距離が 10 m 以内に生育していたカラマツ 9 本 (総本数の 64%) のバイオマスは、炭素重量で 342 kgC (生重量=1,307 kg, 乾物重量=759 kg), 20 m 以内のカラマツ 17 本 (39%) のバイオマスは、648 kgC (生重量=2,481 kg, 乾物重量=1,439 kg), 30 m 以内のカラマツ 24 本 (25%) のバイオマスは、924 kgC (生重量=3,545 kg, 乾物重量=2,053 kg) であった。ここで得られたバイオマスを実際に生育しているカラマツの総本数あたりに換算し、スキャン角 170° 内の面積で割れば、単位面積あたりのカラマツのバイオマスが推定できる。結果は、10 m 以内で、炭素重量で 3.59 kgCm^{-2} (生重量= 13.7 kgm^{-2} , 乾物重量= 7.95 kgm^{-2}), 20 m 以内で 2.83 kgCm^{-2} (生重量= 10.8 kgm^{-2} , 乾物重量= 6.28 kgm^{-2}), 30 m 以内で 2.80 kgCm^{-2} (生重量= 10.7 kgm^{-2} , 乾物重量= 6.21 kgm^{-2}) であった。ここで、可搬型 SL の計測対象とした同地区において、カラマツの胸高直径を実測して求めた単位面積あたりのバイオマスは 10 m 以内で 2.58 kgCm^{-2} , 20 m 以内で 2.94 kgCm^{-2} , 30 m 以内で 2.88 kgCm^{-2} であった。

すなわち単位面積あたりの炭素重量の推定誤差は、10 m 以内で 28.0%, 20 m で 4.3%, 30 m で 2.7% であった。10 m

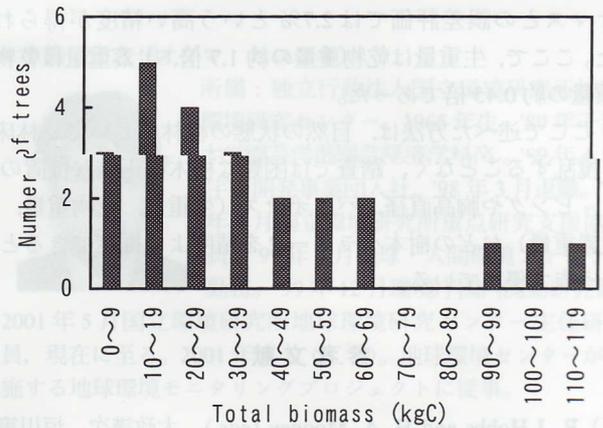


Fig. 10 Histogram of total biomass (carbon weight) in the test site.

以内の誤差が大きいのは、可搬型 SL を設置した場所周辺がカラマツ林のギャップにあたり、20 m や 30 m に比べて、カラマツの本数が局所的に少ない場所であったためと考えられる。しかしながら 20 m から 30 m と範囲が広がるほど誤差が炭素重量で 4.3% から 2.7% と低くなる結果が得られた。

以上の結果より、胸高直径とバイオマス (生重量, 乾物重量, 炭素重量の何れか) との関係が前もってわかっているならば、可搬型 SL を用いて計測 (あるいは推定) された胸高直径から、個々の樹木のバイオマスが推定可能であることが示された。特に可搬型 SL からの距離が 30 m の範囲内において、単位面積当たりのバイオマスを誤差 2.7% という高い精度で推定することができるということがわかった。

4. おわりに

本研究では、手前の木の小枝や広葉樹、あるいは林床植物などで遮られて見通しのあまりきかない自然状態のカラマツの樹林を対象として、可搬型 SL を用いて森林内部を 3 次元計測し、胸高直径を求める方法について検討した。また、個々の樹木位置のマッピングとバイオマス (生重量, 乾物重量, 炭素重量) の推定を行った。

その結果、胸高直径が直接計測できなくても、前もって (1) 式の係数 $k(h)$ を求めておけば、樹林内の個々の樹木において、計測可能な任意の高さの樹幹直径から、 $RMSE = 7.3 \text{ mm}$ の精度で胸高直径を推定できた。また、自然の状態のカラマツ林において、一カ所からの計測により、10 m 以内で 100% (計測可能本数 = 14 本), 15 m 以内で 83% (24 本), 20 m 以内で 66% (29 本), 30 m 以内で 45% (44 本) の樹林マップと胸高直径を求めた。さらに、胸高直径と地上部のバイオマスとの関係を二次回帰式 ($R^2=0.96$) で近似し、計測 (推定) された胸高直径から個々の樹木のバイオマス (生重量, 乾物重量, 炭素重量) を推定することができた。また、実測で得られた単位面積あたりのバイ

オマスとの誤差評価では2.7%という高い精度が得られた。ここで、生重量は乾物重量の約1.7倍、炭素重量は乾物重量の約0.45倍であった。

ここで述べた方法は、自然の状態の樹林において、林床を攪乱することなく、踏査では困難な樹木の正確な位置のマッピングや胸高直径、バイオマス（生重量、乾物重量、炭素重量）などの樹木パラメータを精度よく推定できるという点で優れている。

参考文献

- 1) R. J Hobbs and H. A. Mooney (eds.), 大政謙次, 恒川篤史, 福原道一(監訳): 生物圏機能のリモートセンシング, Springer-Verlag, 東京, 1993.
- 2) W. M. Post: Uncertainties in the terrestrial carbon cycle. *Vegetation Dynamics and Global Change*, A. M. Solomon and H. H. Shugart (eds.), pp. 116-132, Chapman and Hall, New York, 1993.
- 3) V. A. Sample (ed.), 後藤恵之(監訳): 生態系管理へのリモートセンシングとGISの活用, フジ・テクノシステム, 東京, 1999.
- 4) R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin N. H. Ravindranath, D. J. Verardo and D. J. Dokken(eds.): *Land Use, Land-Use Change and Forestry*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- 5) 山形与志樹, 小熊宏之, 土田 聡, 関根秀真, 六川修一: 京都議定書で評価される吸収源活動のモニタリングと認証に関わるリモートセンシング計測手法の役割, 日本リモートセンシング学会誌, 21, pp. 43-57, 2001.
- 6) 大隅眞一(編) 森林計測学講義, 養賢堂, 東京, 1995.
- 7) E. Rignot, J. Way, C. Williams and L. Viereck: Radar estimates of aboveground biomass in boreal forests of interior Alaska, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32, pp. 1,117-1,124, 1994.
- 8) W. B. Cohen, T. A. Spies and M. Fiorella: Estimating the age and structure of forests in a multi-ownership landscape of western Oregon, U.S.A., *Int. J. Remote Sens.*, 16, pp. 721-746, 1995.
- 9) R. H. Waring, J. Way, E. R. Hunt, Jr., L. Morrissey, K. J. Ranson, J. F. Weishampel, R. Oren, S. E. Franklin: Biologists toolbox-imaging radar for ecosystem studies. *BioScience*, 45, pp. 715-723, 1995.
- 10) M. Nilson: Estimation tree heights and stand volume using an airborne lidar system, *Remote Sens. Environ.*, 56, pp. 1-7, 1996.
- 11) E. Naeset: Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data, *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.*, 52, pp. 49-56, 1997.
- 12) M. Flood and B. Gutelius: Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar, *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 63, pp. 327-366, 1997.
- 13) 大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 吉見健司: ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の3次元リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, 20, pp. 34-46, 2000.
- 14) 沼田洋一, 田村正行: レーザプロファイラによる広域樹高分布の計測手法の研究, 日本測量調査技術協会, APA, 78, pp. 52-62, 2001.
- 15) 林 真智, 沼田洋一, 小熊宏之, 山形与志樹: リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測, 写真測量とリモートセンシング, 40, pp. 41-46, 2001.
- 16) D. J. Harding, M. A. Lefsky, G. G. Parker, J. B. Blair: Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests, *Remote Sens. Environ.*, 76, pp. 283-297, 2001.
- 17) K. Omasa, G. Y. Qiu, K. Watanuki, K. Yoshimi and Y. Akiyama: Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environ. Sci. & Tech.*, in press.
- 18) 大政謙次: 植生調査のための可搬型イメージングライダーの開発, 農業における新しい情報化技術, 岡野利明, 星 岳彦, 竹内利信編, pp. 75-91, 農業電化協会, 東京, 2000.
- 19) K. Omasa: Phytobiological IT in agricultural engineering. *Proc. the XIV Memorial CIGR World Congress*, pp. 125-132, Nov. 2000.
- 20) 大政謙次, 吉見健司, 沖 一雄, 日坂 彰, 植西マイケル高照: 可搬型イメージングライダーによる樹木のリモートセンシング-樹冠高の推定-, 日本リモートセンシング学会 第30回学術講演会講演論文集, pp. 131-132, May, 2001.
- 21) 吉村充則: 林冠プロセスと空間スケール, *科学*, 71, pp. 1,210-1,216, 2001.
- 22) H. J. M. Bowen: *Environmental Chemistry of the Elements*, Academic Press, New York, 1979.
- 23) 高橋英一: 比較植物栄養学, 養賢堂, 東京, 1974.

〔著者紹介〕

●大政 謙次 (オオマサ ケンジ)



所属：東京大学大学院農学生命科学研究科。1950年12月生。'75年愛媛大学大学院農学研究科（農業工学）修士課程修了。'76年環境庁国立公害研究所（現在：国立環境研究所）に入所。'87年同技術部室長。'90年同生物圏環境部室長。'98年筑波大学生物科学研究科教授（併任），'99年東京大学大学院農学生命科学研究科教授，現在に至る。'85年工学博士（東京大学）。植物や生態系の構造や機能の画像計測，リモートセンシングに関する研究に従事。また，環境汚染や地球温暖化，砂漠化などの植物・生態系分野の研究も行っている。科学技術庁長官賞（研究功績者表彰），日本リモートセンシング学会論文賞，日本生物環境調節学会奨励賞・学会賞，日本農業気象学会賞〔学術賞〕，CELSS学会論文賞・功労賞，CIGR2000 Outstanding Contribution Awardなどを受賞。日本リモートセンシング学会，計測自動制御学会，環境科学会，生態工学会，農業土木学会，日本植物学会，CIGR，ISPR，SPIE，AAAS，ASPBなどの会員。aomasa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

●浦野 豊 (ウラノ ユタカ)



所属：東京大学大学院農学生命科学研究科。1964年12月生。'86年甲南大学理学部卒業後NECAcos-6テクニカルSEとして日本電気等に勤務し，'93年より5年間，極圏から熱帯に至る主に発展途上国を49か国巡る。The University of Hawaii-Department of oceanography and zoology (Honolulu, USA) ('96-'97年)，The University of the South Pacific-Global Coral Reef Monitoring Network (Suva, Fiji) ('97年)，The University of Queensland-Environmental management course for postgraduate diploma (Brisbane, Australia) ('97年)にてそれぞれセメスター実習聴講生として熱帯陸域/海洋生態学および環境学を学ぶ。'98年帰国，筑波大学大学院環境科学研究科に入学し，中国科学院および内蒙古大学の協力で温帯ステップ植生を調査研究し修士号を取得（2000年）。現在は東京大学大学院農学生命科学研究科博士後期課程に在学し，ライダーによる植物群落の3次元計測とその生態分野への応用に関する研究を行っている。aa17088@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

●小熊 宏之 (オグマ ヒロユキ)



所属：独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター。1965年生。'89年千葉大学園芸学部園芸経済学科卒。'89年4月宇宙開発事業団入社，'98年3月退職。'98年4月国立環境研究所重点研究支援協力員，'99年4月地球・人間環境フォーラム勤務。'99年12月環境庁国内流動研究員。2001年5月国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員，現在に至る。2001年博士（工学）。地球環境センターが実施する地球環境モニタリングプロジェクトに従事。

●藤沼 康実 (フジヌマ ヤスミ)



所属：独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター。1947年10月生。'74年東京農工大学大学院農学研究科（植物防疫学）修士課程修了。'74年茨城県立農業大学校に勤務。'76年環境庁国立公害研究所（現在：国立環境研究所）に入所，技術部植物専門官。'89年同生物環境部主任研究員。'94年地球環境研究センター研究管理官，現在に至る。'92年農学博士（大阪府立大学）。地球環境研究センターが実施する環境モニタリングプロジェクトの企画・調整業務を行うとともに，森林生態系の炭素循環機能に関する観測研究などに従事。農業気象学会，大気環境学会，生態工学会，日本造園学会などの会員。