

# 農業・環境分野における 先端的画像情報利用

—フライトイメージングからリモートセンシングまで—

東京大学 大学院  
農学生命科学研究科 教授 大政 謙次 編著

社団法人 農業電化協会

# 第8章



## 森林の3次元リモートセンシング

### 1. はじめに

森林生態系の機能解明や保全、管理などのために、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。また、地球温暖化防止のための京都議定書における炭素吸収源の問題に関連して、植林活動や森林破壊などによる森林のバイオマス（炭素蓄積量）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ている。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に関連した研究が盛んに行われるようになってきた<sup>1-3)</sup>。

従来から森林の構造やバイオマスを調べるために、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きた<sup>1, 4)</sup>。また、新しく人工衛星や航空機に搭載されはじめたハイパースペクトルセンサー（例えば、EO-1 Hyperion）による観測が期待されている。しかし、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る。最近、航空機搭載のスキャニングライダー（SL, 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<sup>5-8)</sup>。

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。通常、樹木の毎木調査や層別刈り取りを行うことによりバイオマスを求めるが、このためには多大な時間と労力を必要とする<sup>9)</sup>。また、林床に多くの草木が繁茂する自然の状態の森林では、調査により、林床を踏み荒らすという問題もあった。このようなことから、最近、地上調査にも、可搬型のSLを用い、樹木の3次元構造やバイオマスを計測することが行われるようになってきた<sup>8, 10-14)</sup>。

SLは、レンジスキャナーやレーザースキャナー、イメージングライダーなどと呼ばれることもあるが、ここでは、SLを用いた森林の3次元構造や樹木位置のマッピング、バイオマスなどを求めるための新しい3次元リモートセンシングについて、筆

者らの研究を中心に紹介する。

## 2. 航空機SLによるリモートセンシング

陸域の航空機ライダーによる観測は、1980年代に、地形図作成の分野で利用され始めた。当初、森林の存在は、地形計測の誤差要因としての問題として扱われていたが、1980年代の中頃から、バイオマス量を推定するための樹冠（草本も含む）の平均高を求めるのに応用されるようになった。この頃使用されたライダーシステムは、飛行方向に沿っての航跡上のみを計測していくものであった<sup>15)</sup>。

1990年代の中頃になると、飛行方向に直角に、パルスレーザーをスキャン照射し、地形や樹高を計測するSLシステムが使用され始めた<sup>16-18)</sup>。しかし、スキャン間隔が粗く、地上でのビーム径（Footprint）が1 m以下になると、地表面や平均樹高の正確な計測が難しく、実際の樹高に対して計測値が極端に小さくなる傾向がみられた。このため、数m以上の大きなビーム径のものが有効とされ、NASAのESSP（Earth System Science Pathfinder）プログラムによるVCL（Vegetation Canopy Lidar）では、人工衛星からの観測ということもあって25mのビーム径での観測が計画され、航空機からの試験観測が実施されている<sup>6)</sup>。

一方、樹高の計測精度を高めるために、最近、数十 cm 以下の小さなビーム径でも、ビーム径に比べてスキャン間隔を細かくし、地表の観測面を漏れなくスキャンできる能力をもつヘリコプター搭載の高空間分解能SLシステムが開発され、樹冠高やバイオマスの推定に利用されている<sup>5,7)</sup>。図1は、このSLシステムによる地表面と樹冠高の3次元リモートセンシングの概念図である。このシステムでは、ヘリコプターから進行方向に対して直角方向に、パルスレーザー（25,000Hz）を地表面に向かってスキャン照射し、地表面や樹木から帰ってくる反射パルスの飛行時間（Time-of-flight）を計測することにより、地表面との距離を算出する。その際、樹冠の計測はレーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモード（FP-mode, First pulse mode）により、地表面の計測はレーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモード（LP-mode, Last pulse mode）により行う。そして、あらかじめGround GPS（Global Positioning System）により正確に計測された基準位置（三角点に設置）と、ヘリコプターに搭載されているAirborne GPSや機体の位置や姿勢をGPSと結合して正確に計測するIMU（Internal Measurement Unit）のデータ、さらに、レーザーのスキャン角（照射角度）及び計測された距離のデータなどから地上のレーザー反射位置の正確な3次元座標を算出し、標高を示すメッシュデータ（DEM：Digital Elevation Model）を得る（図1の流れ図を参照）。なお、このシステムにより求められる絶対座標の誤差は、20～30cm程度であるが、基準点からの相対座標での誤差で見ると、距離計測の精度である15cm以内である。

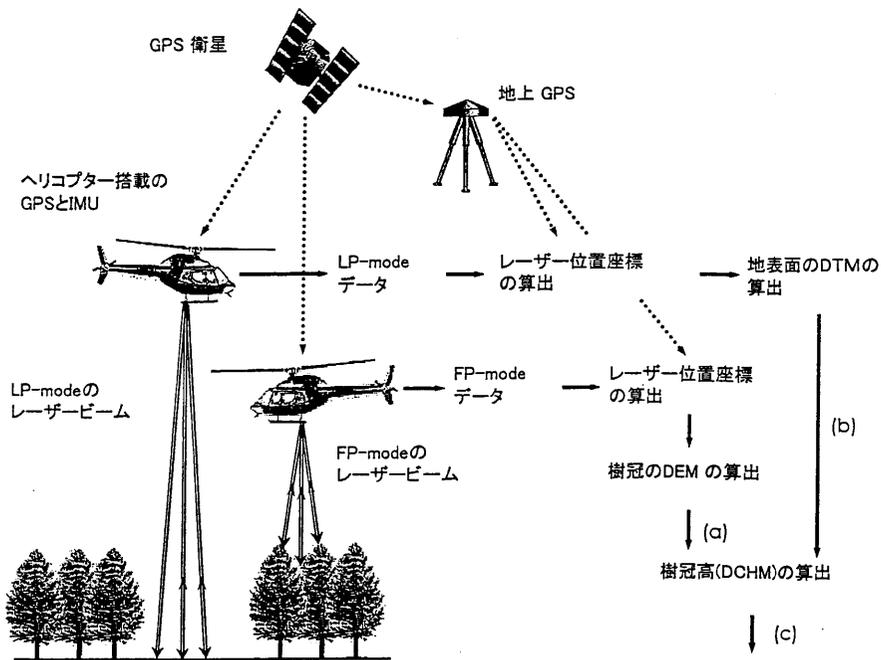


図1 ヘリコプター搭載の高空間分解能SLシステムによる地表面と樹冠高の3次元リモートセンシングの概念図<sup>5)</sup>

FP-modeは、レーザー光が反射して最初に戻ってくるパルスを受信するモードであるので、このモードにより得られた標高メッシュデータ (FP-mode DEM) (図1 (a) 参照) は、樹木が生育している場所では、その位置で最も高い樹冠の標高を与える。図2は谷間の地域のFP-mode DEMの例である。下方の道路に隣接して植物園があり、この園内には、針葉樹や広葉樹の高低木、110余種が植栽されていた。また、研究園の右上方に隣接した山の斜面には、麓から頂上に向かって、アオキ-イロハモミジ群落、コナラ群落、オオバーヤシャブシ群落が広がっていた。

一方、LP-modeは、レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモードであるので、樹間を通して地表面までパルス光が到達した場所では、地表面の標高を与える。このため、このモードにより得られるデータにおいて、周辺に比べて標高が特に低い場所を抽出し、補間処理をすることにより、地表面の形状 (地形、建物を含む) を示す標高メッシュデータ (DTM; Digital Terrain Model) (図1 (b) 参照) を得ることができる。図3はLP-mode DEMから推定されたDTM (建物を含む) を鳥瞰図として示したものである。右上の山の斜面が高く、また、左上から右下に向かって、標高が低くなっていることがわかる。対象地域の地形図や地上調査の結果から判断して、樹木が茂っていたにもかかわらず、植物園内の地形が正確に描かれていた。また、山の斜面や建物、道路、河川なども細部にわたって現況と一致していた。

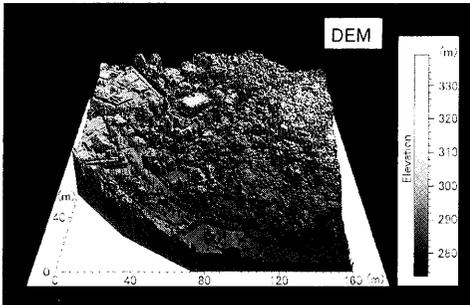


図2 谷間の地域のFP-mode DEMの鳥瞰図<sup>5)</sup>

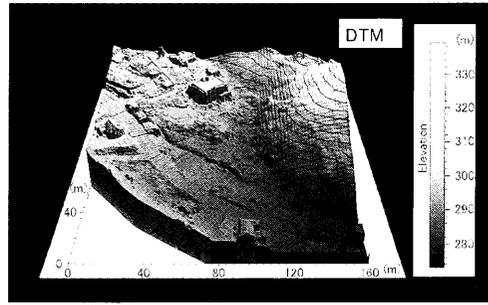


図3 LP-mode DEMから推定されたDTM(建物を含む地表面)の鳥瞰図<sup>5)</sup>

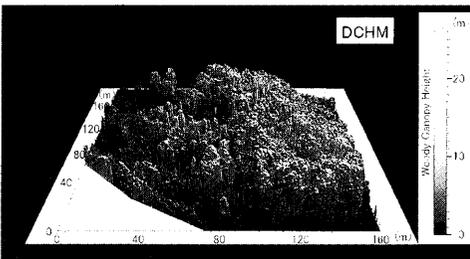


図4 FP-mode DEM(図2)からDTM(図3)を引くことによって求められたDCHM(樹冠高)の鳥瞰図<sup>5)</sup>

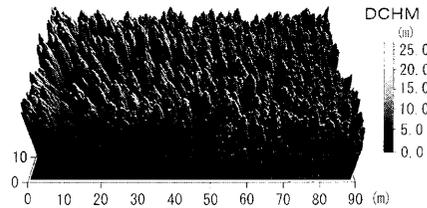


図5 スギ林のDCHM(樹冠高)の鳥瞰図<sup>7)</sup>

図4はFP-mode DEMからDTMを引くことによって求められた樹冠高のメッシュデータ(DCHM; Digital Canopy Height Model)(図1(c)参照)の鳥瞰図である。山や谷、建物などの部分が除かれ、平地に樹木が生育しているように表示されている。この鳥瞰図から、樹冠の形や樹木の高さがわかる。個々の樹木において、針葉樹で47cm、広葉樹で40cmの誤差内での計測が可能であった。また、RMSEでみると、針葉樹で19cm、広葉樹で12cm程度の誤差であった。なお、DCHMの算出の際に、ノイズ除去のために $3 \times 3$ メッシュのメディアンフィルター処理を行った。

次に、秋田地方のスギ林を対象として、DCHM画像から樹冠高だけでなく、樹冠の形状やバイオマス(炭素蓄積量)を求める手法について検討した。図5は、FP-mode DEMからDTMを引くことによって得られたスギ林のDCHMを鳥瞰図である。このDCHM画像から、画像処理によって個々の樹木の頂点を求め、DCHM画像と合成表示したのが図6である。この樹冠高の頂点から、樹木マップと樹高が求められる。図7は、図6において検出されたスギ394本の樹高のヒストグラムである。この領域のスギは、6.0mから27.0mのあいだに分布していたが、その大半(90%)は18.5mから26.0mの範囲にあった。なお、平均樹高は21.3mであった。

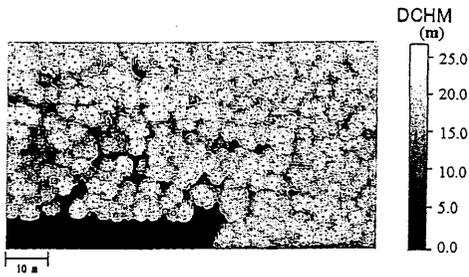


図6 スギの頂点とDCHMの合成画像<sup>7)</sup>  
 + : 頂点, ○ : 未検出, □ : 誤検出

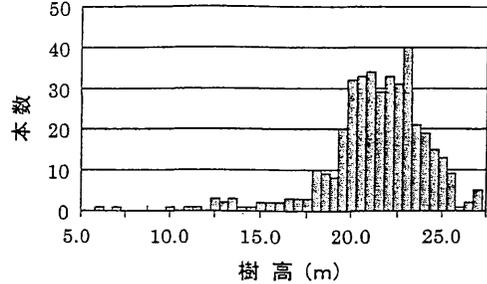


図7 図6における検出されたスギ394本の樹高のヒストグラム<sup>7)</sup>

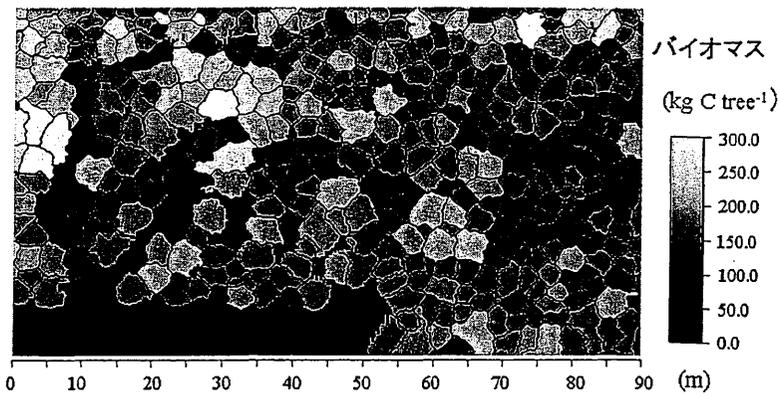


図8 個々のスギの樹冠形状と全バイオマス (炭素重量)<sup>7)</sup>

一般に樹木の幹材積の推定には、樹高と胸高直径の関数である材積式が用いられる。幹材積に全乾比重0.35を掛けると乾物重量が求まり、その乾物重量に0.45を掛けると幹の炭素重量( $\text{kg C tree}^{-1}$ )が求まる。樹高のみの関数で表すと誤差は大きくなるが、3 mから30mまでの全国のスギのデータ及び秋田のスギのデータを用いて求めた幹の炭素重量( $C_{\text{stem}}$ )と樹高(H)との関係は $C_{\text{stem}}=0.0119H^{2.9696}$  ( $R^2=0.933$ )、同様に、枝と葉、根などの炭素重量 ( $C_{\text{BFR}}$ ) と樹高との関係は、 $C_{\text{BFR}}=0.0075H^{2.9516}$  ( $R^2=0.864$ ) で表される。これらの式を用いて個々のスギの全炭素重量を計算したのが図8である。この図では、樹冠の形状も同時に示されている。大半のスギが110kg から300kgまでのあいだにあり、平均は $175.9\text{kg C tree}^{-1}$ であった。

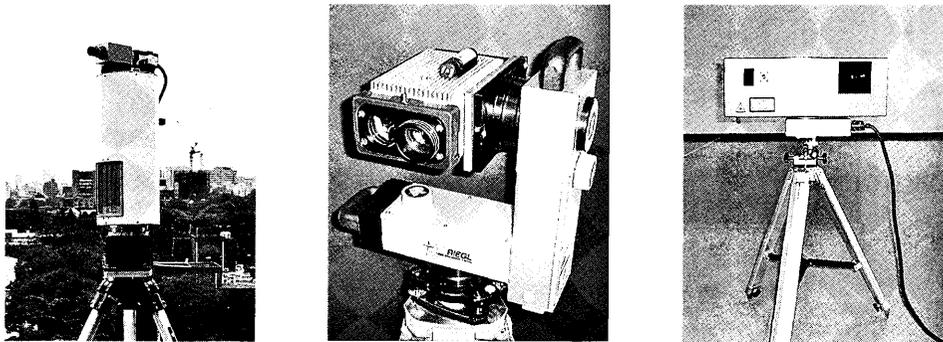
以上の結果から、小さなビーム径のヘリコプター搭載SLシステムを用いて、地表の観測面を漏れなくスキャン計測することにより、地形や樹冠の標高を正確に計測できることがわかった。また、計測された樹冠高を解析することにより、樹冠の形状やバイオマス (炭素重量) を精度よく求めることができた。

### 3. 可搬型SLによるリモートセンシング

森林の3次元構造や正確なバイオマスを求めるには、航空機からのリモートセンシングだけでなく、地上での計測、調査が不可欠である。そこで、最近では精度の高い可搬型SLを地上あるいは樹冠上部に設置して、森林構造や林分パラメータを計測する試みがなされている<sup>8,11-11)</sup>。

図9は、可搬型SLの写真である。距離計測の範囲や精度は装置によって異なるので目的に応じて選択する必要がある。一般に、Time-of-flight法は、長い距離の計測に適しており、距離精度も距離に依存しないという特徴がある。しかし、10m以下の近距離の計測では、光プローブ法などの三角測量の原理に基づく装置に比べて距離精度が悪くなる。

図10は、可搬型のSLを用いて、比較的林床植物が多く茂る初秋のカラマツ林を計



測定原理：Time-of-flight 法  
測定距離：5-300m  
距離精度：25mm

Time-of-flight 法  
2-60m  
8mm

光プローブ法  
3.5-10m  
0.5(3.5m)-5mm(10m)

図9 可搬型SLの例



図10 可搬型SLを用いたカラマツ林の距離画像の計測例<sup>11)</sup>

測した距離画像の例である。林内には、カラマツの他、各種の広葉樹が存在し、また、林床植物としてシダ類やササ類が生育していた。使用した可搬型SLの性能は、計測範囲が2～60m、計測の距離精度が±8mm、水平、垂直方向の角度分解能が±0.009度であった。また、樹幹計測の精度を上げるために、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20m離れた地点で直径約20mmであった。

図11は、図10に示した距離画像から検出できる樹木位置をマッピングしたものである。図は、可搬型SLの設置点を(0, 0)の原点として、樹幹径が計測できた樹木(24本)と幹径が計測できなかった樹木(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、樹幹径が計測できた樹木は、可搬型SLの設置位置から10m以内で64% (計測可能本数=9本)、15m以内で52% (15本)、20m以内で39% (17本)、30m以内で25% (24本)であった。また、樹幹径が計測できなかったものも含めると、10m以内で100% (計測可能本数=14本)、15m以内で83% (24本)、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。

次に、個々の樹木のバイオマス(炭素重量)を推定するために、計測された樹幹径データから、前もって求めておいた胸高直径と任意の高さでの樹幹径との関係式を用いて、対象とする樹木の胸高直径を推定した。さらに、胸高直径と炭素重量の関係式(二次回帰式:  $R^2=0.96$ )から、胸高直径が推定できた24本の樹木の地上部バイオマスを推定した(図12)。24本の樹木の炭素重量は、0.72kgCから109kgCに分布し、68kgC以下の比較的炭素重量の小さいものが全体の88%、39kgC以下のものが63%を占めていた。

次に、図12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。

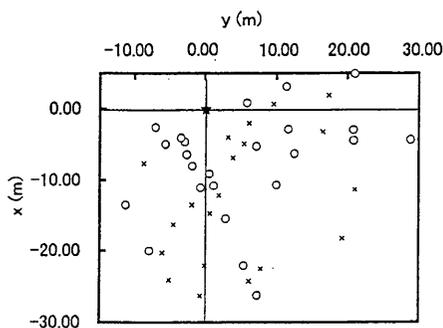


図11 カラマツ林の樹木位置のマッピング<sup>11)</sup>  
○：樹幹径計測可能，X：樹幹径計測不可能

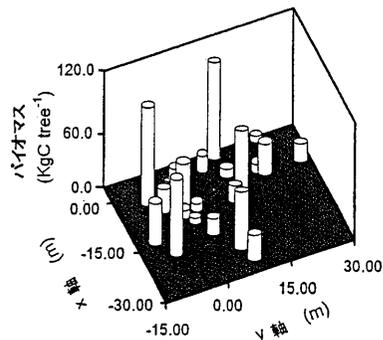


図12 個々のカラマツの地上部バイオマス(炭素重量)<sup>11)</sup>

図12において、可搬型 SL からの距離が10m以内に生育していた樹木9本（総本数の64%）のバイオマスは炭素重量で342kgC、20m以内の樹木17本（39%）のバイオマスは648kgC、30m以内の樹木24本（25%）のバイオマスは924kgC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樹木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、単位面積あたりの樹木のバイオマスが推定できる。結果は、10m以内で、炭素重量で3.59kgCm<sup>-2</sup>、20m以内で2.83kgCm<sup>-2</sup>、30m以内で2.80kgCm<sup>-2</sup>であった。ここで、可搬型 SL の計測対象とした同領域において、樹木の胸高直径を実測して求めた単位面積当たりのバイオマスは10m以内で2.58kgCm<sup>-2</sup>、20m以内で2.94kgCm<sup>-2</sup>、30m以内で2.88kgCm<sup>-2</sup>であった。すなわち、単位面積当たりの炭素重量の推定誤差は、10m以内で28.0%、20mで4.3%、30mで2.7%であった。10m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、20mや30mに比べて、樹木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20mから30m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（炭素重量）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30m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。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（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。

一方、樹木のもつ3次元構造は、光合成などの生命活動と関連して極めて重要である。樹木の3次元構造を表す代表的な指標として、しばしば高さごとの葉面積密度（LAD：Leaf Area Density）が用いられる。LADを算出するための方法として、層別刈り取り法やGap fraction法などが従来行われてきた<sup>19,20</sup>。しかし、層別刈り取り法では測定に多大な時間と労力を要し、破壊測定であるために測定できるサンプルが制限される。またGap fraction法では、森林群落に入射する太陽光の透過率から葉面積の算出を行うが、得られる結果が葉の空間分布や測定時の光条件に影響されるといった問題がある。このような測定方法に加え、最近では航空機搭載型 SL または可搬型 SL を利用したLADの測定が試みられようになってきた<sup>21,22</sup>。ライダーは能動的センサーであるため、気象条件や太陽光の状態に影響されることなく、効率よく高さごとの葉の位置情報を取得できる。この位置情報をもとにLADの算出が行われるが、従来行われてきたライダーを用いた手法では、レーザー光線を上空または地上から樹木に対して垂直に入射させるものであった。レーザー光線を樹木に対して垂直に入射

させる場合、樹木の上層（上空から測定の場合）または下層（地上から測定の場合）にはレーザー光線は比較的よく到達するものの、上層または下層によって遮蔽された樹冠内部に到達するレーザー光線の数は少なくなる。そのため、得られる樹冠内部の葉の位置情報が少なくなり、測定誤差が増大する結果となる。

こうした問題を改善するために、最近、筆者らは可搬型スキャニングライダーを用いた VCP-method (Voxel-based Canopy Profiling Method) を考案した<sup>8,14)</sup>。VCP-method では、レーザー光線は樹木に対して垂直ではなく、垂直方向に対して斜めに傾けられた状態で入射される。またライダーの測定位置は樹木を取り囲む複数の地点に設置される。こうした配慮により、樹木の下層にさえぎられることなく、樹木の全体にわたって樹冠内部の葉までレーザー光線が十分に照射され、その位置情報を得ることが可能となる。各測定地点から得られたデータはコンピューター上で位置合わせされ、その位置情報はボクセルに変換される。ボクセルとは3次元格子点上の立方体であり、この立方体に値を持たせることで3次元情報を表現するもので、2次元平面上のピクセルに相当する。ボクセルの中には葉の位置情報だけではなく、樹冠内部を進むレーザーの光跡に関する情報も付与される。このレーザーの光跡及び葉の位置情報を用いることで、樹木に入射するレーザー光線が各高さでどのくらいの頻度で葉に衝突するかという衝突頻度が算出される。このレーザー光の衝突頻度をもとに、高さごとの LAD の算出を行う。

図13は VCP-method を適用するために、高分解能可搬型スキャニングライダーにより計測されたシラカシの3次元点群画像である。使用したライダーは、三角測量に基づく光切断法の原理（光プローブ法）で測距を行うもので、その性能は、計測距離が3.5mの時の距離精度が約0.5mm、10mの時で約5mmであった（図9参照）。また、水平・垂直の分解能が5mで2.5mmであった。レーザーの照射角度（天頂角）の中心角は75度、測定位置は樹木を取り囲む4箇所とし、各地点の樹木からの距離は約8mであった。得られたデータは位置合わせ後ボクセルに変換され、高さごとにレーザー光の葉に対する衝突頻度が算出された。この衝突頻度はレーザーの入射角及び葉傾斜角に依存するため、これを実際の LAD に変換するためには葉傾斜角の分布を知る必要がある。今回使用したライダーは高分解能であるため、そこから得られる点群データから個々の葉の形状を認識することが可能であった。そこで、得られた点群データから個々の葉の座標データをもとに葉傾斜角を算出し、葉傾斜角の分布を算出した。得られた葉傾斜角分布を考慮して補正を加え、また、木部を取り除いて LAD を算出した結果が図14である。この結果の精度を検証するため、ライダー測定後に同一の樹木に対して層別刈り取り法による実測データの取得が行われた。実測値と VCP-method による測定値を比較したところ、平均絶対誤差率 (Mean Absolute Percent Error) で22%という良好な結果を得た。現在、この手法を様々な植物種の群落構造

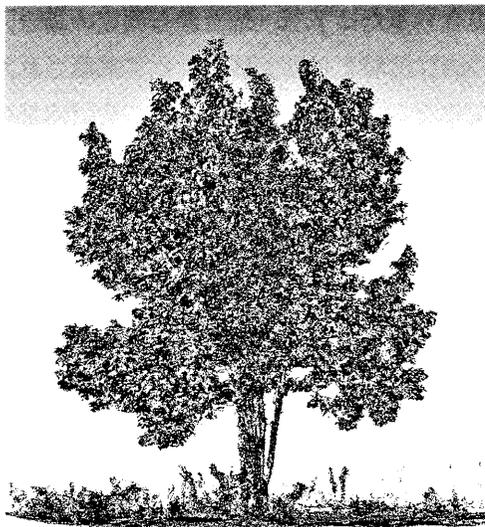


図13 高分解能可搬型スキャングライダーにより計測されたシラカシの3次元点群画像<sup>8)</sup>

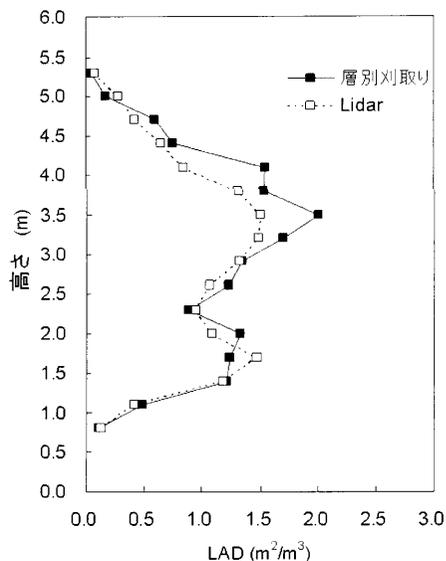


図14 VCP-methodにより算出されたシラカシの高さごとの葉面積密度 (LAD) 分布<sup>8)</sup>

の計測に適用している。

## 4. おわりに

ここでは、高空間解像度をもつヘリコプター搭載型SLおよび可搬型SLを用いた森林の構造や樹木位置のマッピング、バイオマスなどを求めるための新しい3次元リモートセンシングについて紹介した。ここで述べた方法は、従来のリモートセンシング手法に比べて、高空間分解能をもつ3次元情報に基づいていることから、精度の点で優れている。また、地上調査における労力を軽減し、林床に多くの草木が繁茂する自然の状態の森林でも、林床を踏み荒らすことなく調査ができるという利点がある。今後、森林生態系の機能解明や保全、管理などのために、また、京都議定書における炭素吸収源の問題に関連した植林活動や森林破壊などによる森林の炭素吸収量変化を評価するために有効的に利用できよう。

〈引用文献〉

- 1) Hobbs, R.J. and H.A. Mooney (ed.), 大政謙次他 (監訳) (1993) 生物圏機能のリモートセンシング, Springer-Verlag Tokyo.
- 2) 山形与志樹他 (2002) 日本リモートセンシング学会誌 22:494-509.
- 3) Law, B. (2005) Carbon dynamics in response to climate and disturbance: Recent progress from multi-scale measurements and modeling in AmeriFlux. In Plant Responses to Air Pollution and Global Change. (Omasa, K. et al.), 205-213. Springer-Verlag.

- 4) Goward, S.N. and D.L. Williams. (1997) Landsat and earth systems science: Development of terrestrial monitoring. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 63:887-900.
- 5) 大政謙次他 (2000) 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* 20:34-46.
- 6) Lefsky, M.A., W.B. Cohen, G.G. Parker and D.J. Harding (2002) Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioSci.* 52:19-30.
- 7) Omasa, K., G.Y. Qiu, K. Watanuki, K. Yoshimi and Y. Akiyama (2002) Accurate estimation of forest carbon stocks by 3-D remote sensing of individual trees. *Environ. Sci. Technol.* 37:1198-1201.
- 8) Omasa, K., F. Hosoi and A. Konishi (2006) 3D lidar imaging for detecting and understanding plant response and canopy structure. *J. Exp. Bot.* in press and published in electronic version Oct 9.
- 9) 大隅眞一 (編) (1995) 森林計測学講義. 養賢堂.
- 10) 吉村充則 (2001) 林冠プロセスと空間スケールクレーン観測から衛星リモートセンシングまで. *科学.* 71:1210-1216.
- 11) 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.
- 12) 浦野豊・大政謙次 (2003) 可搬型 Scanning lidar によるスギ林のバイオマス推定における誤差評価. *Eco-Engineering.* 15:79-85.
- 13) 吉見健司・細井文樹・清水庸・山田博章・大政謙次 (2004) 可搬型 Scanning Lidar を用いた地表面と樹冠高の3次元計測. *Eco-Engineering.* 16:203-207.
- 14) Hosoi, F. and K. Omasa (2006) Voxel-based 3D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE T. Geosci. Remote. Sens.* 36:3610-3618.
- 15) Nelson, R., W. Krabill and J. Tonelli (1988) Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sens. Environ.* 24:247-267.
- 16) Nilsson, M. (1996) Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens. Environ.* 56:1-7.
- 17) Næsset, E. (1997) Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm Remote Sens.* 52:49-56.
- 18) Næsset, E. and T. Økland (2002) Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sens. Environ.* 79:105-115.
- 19) Weiss, M., F. Baret, G.J. Smith, I. Jonckheere and P. Coppin (2004) Review of methods for *in situ* leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. Forest Meteorol.* 121:37-53.
- 20) Welles, J.M. and J.M. Norman (1991) Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.* 83:818-825.
- 21) Lovell, J.L., D.L.B. Jupp, D.S. Culvenor, and N.C. Coops (2003) Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Can. J. Forest Res.* 29:607-622.
- 22) Radtke, P.J. and P.V. Bolstad (2001) Laser point- quadrat sampling for estimating foliage-height profiles in broad-leaved forests. *Can. J. Forest Res.* 31:410-418.