航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における 樹高と地形との関係

平田 泰雅^{*,1}

平田泰雅：航空機レーザースキャナーデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形との関係 日林誌 87：497~503, 2005 航空機レーザースキャナーによる森林の3次元計測データを用いて、高知県影平市ノ又山国有林ヒノキ人工林における単木樹高と地形因子（尾根からの距離（ d_r ）、谷からの距離（ d_v ）、斜面位置（ $d_r/(d_r+d_v)$ ）、斜面傾斜、斜面方位、標高）との関係を調べた。まず、航空機レーザースキャナーデータからの単木樹高の抽出精度を確認するために、0.5 ha プロットにおいて毎木調査による樹高と航空機レーザースキャナーデータから抽出された樹高を比較した。地上での測定による樹高と抽出された立木の樹高との相関係数は0.94であった。次に、航空機レーザースキャナーデータから研究対象地全体のヒノキの樹高と地形因子を算出した。ここで抽出されたヒノキの樹高を従属変数に、地形因子を独立変数にして重回帰分析を行った。その結果、重相関係数は0.71であり、ヒノキの樹高は、斜面位置と標高に依存することが明らかになった。キーワード：航空機レーザースキャナー、重回帰分析、単木樹高、地形因子

Hirata, Y.: Relationship between Tree Height and Topography in a *Chamaecyparis obtusa* Stand Derived from Airborne Laser Scanner Data. J. Jpn. For. Soc. 87: 497~503, 2005 We investigated the relationship between individual tree heights and topographic factors of their standing positions, such as the distance from a ridge (d_r), the distance from a flow path (d_v), the position on a slope ($d_r/(d_r+d_v)$), the slope angle, the slope aspect and the altitude, in a *Chamaecyparis obtusa* stand located in the Kagehira-Ichinomatayama National Forest in Kochi Prefecture. We compared individual tree heights derived from the field survey with those obtained from airborne laser scanner data for a 0.5 ha sample plot to confirm the accuracy of the identification by airborne laser scanner. The correlation coefficient between tree heights derived from airborne laser scanner data and those derived from the field survey was 0.94. All tree heights and topographic factors in the study area were calculated from the airborne laser scanner data. We performed a multiple regression analysis, using tree height and topographic factors as the dependent variable and the independent variables, respectively. As a result, the multiple correlation coefficient was 0.71 and the analysis made it clear that the tree height of *Chamaecyparis obtusa* depended on the position on a slope and the altitude.

Key words: airborne laser scanner, individual tree height, multiple regression analysis, topographic factor

I. はじめに

森林資源を広域に精度よく把握することは、持続可能な森林管理を行う上で非常に重要である。リモートセンシング技術は広域観測に適した技術であり、森林資源のモニタリングのためのツールとして期待が高い。その一方で、これまでリモートセンシングが扱うスケールと実際の森林において必要とされているスケールとの乖離により、実用化に向けては様々な問題が存在していた（沢田, 1995; 露木, 1995）。1990年代後半以降、それまでと比べて非常に高い地上分解能をもつ衛星（パンクロマティック：1 m 以下、マルチスペクトルバンド：4 m 以下）（IKONOS, QuickBird）の打ち上げや（加藤, 2002）、GPSのSA解除に伴う測位精度の向上（小林, 2002）による航空機レーザースキャナー（以下ALS: Airborne Laser Scanner）の普及により、リモートセンシングによって得られる森林情報が飛躍的に精細化・高度化した。とりわけALSによる森林計測は、従来のリモートセンシングによる2次元観測から

3次元計測への拡張であり、鉛直方向の情報が得られることで、これまで困難であった森林バイオマス、生産ポテンシャル、炭素収支等の推定において、推定精度の向上が期待されている（田村・高槻, 2000）。

ALSを用いた森林計測は、航空機あるいはヘリコプターといったプラットフォーム（以下、航空機と総称）に搭載された計測器から照射されたレーザー光が地上に近づくにつれて広がり、光の一部が森林の林冠表面で反射し、その残りが葉群の間隙から更に進み、途中、幹や枝、下層植生、最後は地表面において反射して計測器に戻ってくる特性を利用した計測である。光の速度は一定であることから、この光の往復する時間を計測することにより、航空機と対象物（林冠表面や地表面）との距離が算出される。その際、高精度のGPSによって航空機の位置を測位する。また、航空機の姿勢とレーザースキャナーの向いている方向を記録することにより、レーザー光が照射された方向、すなわち対象物の方向が計算できる。航空機の位置、対象物の方向、航空機と対象物との距離がわかることで、対象

* 連絡・別刷請求先（Corresponding author） E-mail: hirat09@affrc.go.jp

¹ 森林総合研究所四国支所（780-8077 高知市朝倉西町2-915）

Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 2-915 Asakura-Nishi, Kochi 780-8077, Japan.
（2005年5月30日受付；2005年9月20日受理）

物の位置が計測できることになる。現在、計測器からのレーザー光の照射回数は1秒間に数万回に上り、このような計測点の集合として林冠表面や地表面の復元が可能となる(平田, 2005b)。

航空機からレーザー光を用いて森林を計測する試みは、1980年代にすでに北米で開始されていたが(Maclean and Krabill, 1986; Nelson, *et al.*, 1988), ALS データから林分因子を抽出するための研究はまだ10年に満たない(Hyyppä *et al.*, 2004)。林分因子の抽出に関する研究は、当初、統計的なアプローチにより、林分樹高、立木密度、平均胸高直径、林分材積といった林分因子(Næsset, 1997; Magunussen and Boudewyn, 1998; Magunussen *et al.*, 1999; Means *et al.*, 2000; Lefsky *et al.*, 2001; Næsset and Bjerknes, 2001)を推定する研究が行われてきた。これは計測機器やコンピュータの能力的な制約から、地上に照射されるレーザー光のフットプリント(観測円)が疎であり、必ずしも立木の梢端を含む計測が実施できなかったためである。1990年代終わりには、計測機器および解析機器の飛躍的な向上により、フットプリントが地上を覆い尽くすようにレーザー光を照射することが可能となった。これにより1本1本の立木が複数のフットプリントで覆われることになり、単木レベルの樹高や樹冠サイズといった因子を計測することが可能となってきた(Hyyppä and Inkinen, 1999; Hyyppä *et al.*, 2001; Persson *et al.*, 2002; Brandtberg *et al.*, 2003)。わが国においてもレーザー光の地上照射密度を高めた計測による単木レベルの因子抽出に関する研究が行われている(大政ら, 2000; 米ら, 2002; Takahashi *et al.*, 2005; 平田, 2005a)。

このように、ALSによって単木の抽出が技術的には可能となっているが、現在、広域の森林資源モニタリングの実用化のために大きな障壁となっているのが計測費用の問題である。計測費用を抑えるためには、高々度、高速度での計測により、地上照射密度をなるべく低くしながら、精度よく林分因子を推定するということが求められる。一方、このような計測には二つの問題が生じる。まず、高々度での計測の場合、フットプリントの直径は高度に比例するため、そのサイズが大きくならざるを得ない。比較的平坦な地形に分布する森林では、フットプリントのサイズによって樹高の計測精度はそれほど大きな影響を受けないが(Yu *et al.*, 2004)、わが国のように森林が山岳地域に分布する場合、フットプリントのサイズが大きいくほど地形の影響を受けやすく、樹高を過大推定してしまうことになる(Hirata, 2004)。また、高々度、高速度の計測では地上照射密度が低下するため、統計的なアプローチを用いることになる。これは林分内の優勢木の樹高が一様であることを仮定している。レーザー光の地上照射密度が低い場合には、必ずしもフットプリントが全ての優勢木の梢端をとらえるわけではないため、計測された高さの値のうち最大のもの、あるいは上位の値の平均を林分樹高としている。しかしながら、わが国の森林では林分内の優勢木の樹高が一

様であるという仮定が必ずしも成り立たない。これは、急峻な山岳地域では、斜面下部から尾根部にかけての水分条件が重大な立地要因であり(片桐, 1996)、同一林分であっても斜面のどの位置に林木が立っているかにより樹高成長に差が生じるためである。

林木の成長を左右する条件としては、土壌、気候、地形といった因子が挙げられるため(真下ら, 1958)、これまでも造林の指針として地位推定のための調査が広く実施されてきている(関西地区林業試験研究機関連絡協議会立地部会, 1989)。また、地形図やGISを用いて地形因子を抽出し、地位指数と地形因子との関係を明らかにする研究が行われてきている(寺岡ら, 1991; Chen and Abe, 1999; Mitsuda *et al.*, 2001)。これらの研究においては、5,000分の1の地形図から地形因子を抽出し地位指数との関係を明らかにしている。ALSを用いて林分樹高を導き出す場合、樹高成長が地形因子に依存することから、ALSデータから導き出される地形因子と樹高との関係を明らかにし、統計的アプローチを用いるのに適した優勢木の樹高が一様である領域をどのように設定すればよいかを知ることが重要である。ALSによる計測では、レーザー光が4.5発に1発程度の割合で地上に到達することから(Hirata *et al.*, 2003c; 平田, 2005a)、5,000分の1の地形図からよりも詳細な地形因子が樹高計測と同時に得られる。そこで本研究では、レーザー光の高密度照射によるALSの3次元計測データを用いて、ヒノキ人工林における単木樹高と地形因子(尾根からの距離(d_r), 谷からの距離(d_t), 斜面位置($d_r/(d_r+d_t)$), 斜面傾斜, 斜面方位, 標高)との関係を解析し、傾斜地におけるALSを用いた森林計測について考察した。

II. 方 法

1. 研究対象地および現地調査

本研究の対象地は、高知県大正町に位置する四万十森林管理署管内影平市ノ又山国有林1086林班ろ小班の一部である(北緯33度9分, 東経132度55分)(図-1)。対象林分は、1969年に植栽された33年生(ALS計測時)のヒノキ人工林である。対象地はALSにより計測された範囲のうち、尾根線および谷線で囲まれた6.3haである。対象地の標高は470mから690mの範囲である。対象地の地形は急峻で、平均傾斜角は39.1度である。三つの尾根と二つの谷が存在し、この間の斜面にヒノキが植栽されている。谷に沿っては一部広葉樹が混交している。対象地の土壌タイプは適潤性褐色森林土と弱乾性褐色森林土であり、土壌深度は3(30cm以上, 60cm未満)である。

対象地内にALSデータから得られる単木レベルでの樹高の抽出精度を検証するため、1haのサンプルプロットを設定した。サンプルプロットは100m×100mであり、10m間隔での格子点に立木位置測量のために杭を打ち込んでいる。これにより、サンプルプロットは100の10m×10m方形区に分割される。このサンプルプロット内に植

図-1. 研究対象地とサンプルプロット
Study area and sample plot.

栽されているヒノキの立木調査と立木位置図の作成を2002年11月から2003年3月にかけて行った。まず、全立木のDBHを測定した。樹高については、広葉樹が混交している方形区や、測定が急傾斜のため危険な方形区を除いた0.5 ha (50 方形区) について、超音波による測距計と高度角センサーを内蔵した Vertex (Haglof 社製, スウェーデン) を用いて測定を行った。また、先折れ, 枯損, 被圧状況の確認をして樹高とともに記録した。樹高測定木については, 近傍の格子点からレーザーレンジファインダー (MDL 社製 LaserAce 300, 英国) を用いて, 水平距離, 方位角, 高低差を測量した。同時に, GPS (Ashtech 社製 Promark 2, 米国) を用いて, サンプルプロットの4隅と4隅の中間点のうち尾根上にある2点でGPS測位を行った。各点の測位時間の平均は1時間42分であった。この測位データと国土地理院の電子基準点データ (窪川) とを用いて, 座標解析処理ソフトウェア (Ashtech 社製 Solution, 米国) によって各点の地理座標を算出した。この座標値を用いて, 10 m 間隔での格子点の地理座標を算出し, さらに格子点からの測量データから樹高測定木の地理座標を計算した。

2. ALS データ

2002年10月29日に, 朝日航洋㈱製の ALMAPS (Asahi Laser Mapping System) を用いて試験地における森林計測を実施した。ALMAPS は, カナダの Optech 社と朝日航洋㈱が共同開発した ALTM1025A レーザースキャナー, GPS, 3成分ジャイロ, 地上解析装置, 出力装置で構成される (秋山, 1999)。照射するレーザー光は, 波長 1,064 nm の近赤外線を用いている。プラットフォームとしては, レーザー光の地上照射密度を高めるために, 対地高度, 対地速度を低く設定することが可能なヘリコプター

を使用した。計測時のヘリコプターの対地高度は 250 m, 対地速度は 16.7 m/秒であった。レーザースキャナーのスキャン頻度が 25 Hz, スキャン角が $\pm 12^\circ$, レーザー光の照射頻度が 25,000 Hz, レーザー光の広がり角が 1.0 mrad (mrad: 対地高度 1,000 m からレーザー光を照射した場合, 地上でのフットプリントの直径が 1 m となる広がり角の単位) であった。計測領域の欠落を避けるため, 隣接する飛行コースにおけるレーザー光照射域がオーバーラップするように計測を行った。計測では, ファーストパルス (FP: First Pulse) とラストパルス (LP: Last Pulse) のデータを同時に取得した。また, データの粗密の斑を軽減するため, 矩形波形でのスキャンを行った。ここで得られた ALS データを用いた解析には, GIS ソフトウェアである TNTmips (MicroImage 社製, 米国) を用いた。

計測で得られた LP データから 0.5 m $\times$ 0.5 m のメッシュサイズのデジタル標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を作成した。LP データには, 地面で反射してきたもののほか, 地面まで透過できずに, 林冠や, 幹枝, 下層植生などで反射したものも含まれるので, レーザー光が地面以外で反射してきて得られたデータを除去する必要がある。そこでまず, 各メッシュに含まれる LP データのうちの最小値をそれぞれのメッシュに割り当てた。次に, 周囲のメッシュの値と比較し, 地面以外からと判断される値を取り除き, 値の含まれないメッシュについては周囲のメッシュの値を用いて内挿した。

さらに, 計測で得られた FP データから 0.5 m $\times$ 0.5 m のメッシュサイズの林冠標高モデル (DSM: Digital Surface Model) を作成した。DSM の作成に際しては, 各メッシュに含まれる FP データの標高値のうち最大のものをそのメッシュの値とした。また, FP データを含まないメッシュについては周囲のメッシュの値を用いて平滑化フィルターにより内挿した。このようにして得られた DSM を用いて, 次式からデジタル林冠高モデル (DCM: Digital Canopy Model) を算出した。

$$\text{DCM} = \text{DSM} - \text{DEM} \quad (1)$$

3. ALS による樹高の抽出

サンプルプロットにおいて ALS データから立木の梢端位置と樹高の抽出を行い, 現地調査によって得られた樹高測定の結果と比較した。

DCM において, 針葉樹の樹冠形から周囲のメッシュよりも大きな値を示すメッシュが立木の梢端を表すと考えられる。そこで, 局所最大値フィルター (LMF: Local Maximum Filter) (古家, 2004) を用いて立木の梢端を抽出した。実際の ALS による計測においては, レーザー光が樹冠の窪みや葉群の隙間に入り込む場合があり, 梢端以外に局所的に周囲よりも高い値を取る箇所が生じる。これにより 1 本の立木に対し, 複数の箇所を誤って梢端とし抽出してしまう場合が生じる。そこで, 流域抽出法 (watershed method) (古家, 2004) を用いて, 各立木の樹冠の境界を

抽出した。樹冠として抽出された領域には、1) 梢端として抽出された点の一つ含まれる場合、2) 梢端として抽出された点の一つも含まれない場合、3) 梢端として抽出された点が複数含まれる場合、がある。1) の場合には1本の立木が抽出されたとする。2) の場合には、その領域に立木が含まれないとする。3) の場合には、梢端として抽出された箇所のうち DCM の値が最大の箇所を梢端位置とする。こうして抽出された立木本数と実際の立木本数を比較することにより ALS データによる立木の抽出率を算出した。

梢端位置における DCM の値は、抽出された立木の樹高を表すことになる。そこで、DCM による樹高 H_t と現地調査による樹高 H_f との相関を求め、説明変数を H_t 、目的変数を H_f として回帰分析を行った。

4. 樹高と地形因子との関係

LP データから作成された DEM を用いて、対象地における各立木が植栽されている位置での地形因子を算出した。

まず 0.5 m × 0.5 m メッシュの DEM を用いて対象地の尾根線と谷線を抽出して、ベクターデータとした。これらの尾根線および谷線のベクターデータと DEM を用いて、それぞれの尾根線および谷線からの地表面に沿った距離を表すラスターデータを算出した。

次に、サンプルプロットにおける解析と同じ方法を用いて、対象地内の立木の梢端を抽出した。その際、現地調査で谷に沿って 10 m 以内の範囲内で高木の広葉樹が混交していることが確認されたことから、GIS 上で谷線のベクターデータに対して両側 10 m のバッファゾーンを発生させて、この領域に含まれる梢端を除外した。ここで抽出された立木には、優勢木だけではなく、劣勢木のうち樹冠が優勢木の樹冠に被陰されていないものも含まれている。単木樹高と地形との関係を調べるには、地位を求める場合と同様に優勢木を対象とし、劣勢木は除くべきである。そこで、対象地内を 10 m × 10 m メッシュに区切り、各メッシュでの最大樹高の立木を解析の対象として抜き出した。これらの立木の位置をベクターデータとし、それぞれの位置における尾根からの距離 (d_r) と谷からの距離 (d_t) を、先に作成した尾根線および谷線からの地表面に沿った距離を表すラスターデータから抽出した (図-2(a))。その際、尾根線および谷線の距離は、最短距離ではなく、立木が位置する斜面の上部および下部に位置する尾根線および谷線からの最短距離とした (図-2(b))。さらに、斜面位置を尾根からの距離と谷からの距離の合計に対する尾根からの距離の割合 ($d_r/(d_r+d_t)$) として算出した。斜面傾斜 (slp)、斜面方位については DEM から算出した結果を用いた。斜面方位について重回帰分析を行うために、それぞれの値から 180 度を引いた値の絶対値を用いた。これは、斜面方位が南向きの場合に 0 度となり、北向きの場合に 180 度となり、日照時間の最も長い南向きの斜面からの隔たりをあらわす変数 ($drct$) とした。標高 (alt) は立木位置にお

図-2. 各立木に対する尾根からの距離 (d_r) と谷からの距離 (d_t) の算出

Calculation of the distance from a ridge (d_r) and the distance from a flow path (d_t) for a standing tree.

る DEM の値を用いた。

以上の結果を用いて、DCM から抽出されたヒノキの樹高を従属変数に、 d_r 、 d_t 、 $d_r/(d_r+d_t)$ 、 slp 、 $drct$ 、 alt の地形因子を独立変数にして重回帰分析を行った。

III. 結 果

対象地のヒノキ林の現地調査を行った結果、樹高の平均およびその標準偏差は、14.0 m および 1.6 m であり、DBH の平均および標準偏差は 18.4 cm および 3.6 cm であった。また、立木密度は、1,636 本/ha であった。樹高測定木の樹高分布を図-3 に示す。

サンプルプロットのうち対象とした 0.5 ha において DCM から抽出された立木本数は 746 本で、実本数 976 本に対して抽出率は 76.4% であった。DCM による樹高 H_t と現地調査による樹高 H_f との関係を図-4 に示す。この測定における RMS 誤差は 0.32 m であった。これらの相関を分析した結果、強い正の相関がみられ、相関係数は 0.94 で、1% 水準で有意 (両側) であった。また、回帰分析の結果、回帰式は、

$$H_f = 0.90 H_t + 1.32 \quad (2)$$

であった。対象地において計測された H_t は 10 m から 18 m であり、(2) の回帰式を用いた予測値との差分は 0.5 m 以下であることから、計測された H_t を用いて樹高と地形因子との重回帰分析を行って差し支えないと考えられる。

谷線に沿って両側 10 m の領域を取り除いた後の解析の

図-3. サンプルプロットにおける樹高分布
Distribution of tree height in the sample plot.

図-4. DCM による樹高 H_1 と現地調査による樹高 H_f との関係
Relationship between tree heights derived from DCM (H_1) and those derived from the field survey (H_f).

図-5. 抽出された立木位置の斜面傾斜のヒストグラム (上) と斜面方位のレーダーチャート (下)
Histogram of slope gradient (upper) and radar chart of direction (lower) of the positions of standing trees extracted.

対象面積は 4.3 ha であった。この領域において梢端として抽出された本数は 5,066 本であり、ha 当りの平均抽出本数は 1,178 本であった。ここで抽出された梢端から、5 m×5 m のメッシュでの最大樹高の立木を抜き出した結果、解析の対象とする立木は 563 本であった。これらの立木位置での斜面傾斜の平均および標準偏差は 38.8 度および 8.4 度であった。それぞれの立木位置での斜面傾斜のヒストグラムと斜面方位のレーダーチャートは図-5 のとおりであった。この結果から、解析に用いた対象地は全般的に急斜面であり、また、斜面方位はほぼ北と東の間を向いていることがわかる。

解析の対象とする立木 563 本に対して DCM から抽出されたヒノキの樹高を従属変数に、 d_r , d_t , $d_r/(d_r+d_t)$, slp , $drct$, alt の地形因子を独立変数にして重回帰分析した結果は表-1 のとおりである。重回帰係数は 0.71 であり、回帰式は有意水準 0.1% で有意であった。表-1 の結果から、単木樹高を地形因子から推定する場合に、斜面方位が影響していないことがわかる。標準偏回帰係数から、単木

の樹高には標高と斜面位置が最も影響しており、標高が高いほど、また、斜面上部であるほど樹高が低くなる傾向がみられた。

IV. 考 察

本研究においては、ALS を用いて統計的に林分因子を推定する際に問題となる、同一林分内での樹高と地形因子との関係を明らかにした。

Takahashi *et al.* (2005) は、急傾斜地に生育するスギ人工林においてレーザー光の高密度地上照射による ALS の有効性を明らかにしており、本研究の結果は、ヒノキ人工林においても高密度地上照射の ALS データを用いて樹高推定を精度よく行うことが可能であることを示している。ただし、急傾斜地の場合には、林木の傾きが樹高の推

表-1. 樹高と地形因子との重回帰分析の結果
The result of a multiple regression analysis using tree height and topographic factors.

Independent variables	Partial regression coefficient	Standardized partial regression coefficient	F	p
$d_r (d_r + d_t)$	1.5	0.25	6.7	0.01
d_t	-0.017	-0.17	11.4	<0.01
d_r	0.016	0.17	4.9	0.03
slp	0.015	0.09	5.3	0.02
$drct$	0.0023	0.06	3.0	0.08
alt	-0.0086	-0.33	80.1	<0.01
Constant	18.8			

定に影響を与えることになる(平田, 2005a)。Takahashi *et al.* (2005) が対象とした急傾斜地の林分の平均樹高は 18.9 m であり, 本研究におけるヒノキ林の平均樹高は 14.0 m であるため, 林木の傾きの影響があまり顕著ではなかったが, 樹高の高い林分では, 林木が谷側に傾いた場合, 樹高が過大に推定されてしまう。これは ALS データから算出される樹高が, 梢端位置での標高値と梢端位置の直下の地面の標高値の差であることによる。これまで林分樹高の推定においては, レーザー光の地上照射密度が小さいために, フットプリントが梢端を含まず過小推定になる場合が多かった (Hyypä *et al.*, 2004)。しかしながら, 今後, わが国のような急傾斜地で ALS を用いる場合には, 林木が谷側に傾くことにより過大に推定されるという誤差と, レーザー光の地上照射密度によっては過小に推定されるという誤差の両方を考慮しなければならない。すなわち, 同じ林分を ALS を用いて計測する場合でも, 計測パラメータの違いにより, 樹高が過大に推定される場合と, 過小に推定される場合があるということになる。

本研究の対象地はおおむね急峻であり, また斜面方位がほぼ北から東向きであったため, 重回帰分析においては斜面傾斜および斜面方位といった地形因子が単木樹高の違いに影響していなかった。わが国においては林班界が尾根筋や沢沿いに定められており, さらに, 小班の設定においても地形的特徴は境界を設定する際の重要な因子となっている。結果として, 同一林分の斜面は比較的同じ方位を向いており, また, その傾斜角も比較的狭い範囲の値を取る場合が多い。そのため, 単木樹高は地形因子のうち標高と斜面位置という水分条件を大きく左右する因子が最も影響を与えることになる。このため高々度, 高速度で ALS を用いる場合の林分の樹高の推定精度を向上させるためには, 標高帯と斜面位置, たとえば, 斜面上部, 下部, 中部により林分を分割して樹高を推定すればよいということになる。これらの地形因子は ALS データから容易に算出される因子であり, 急峻な山岳地域においてはこれらの因子と統計的なアプローチを組み合わせた手法の適用が有効であると考えられる。また, 隣接する林分との境界を同定できない場合があるため, 現在急速に整備が進んでいる林小班に関する GIS データを重ね合わせて用いることが効率の

よい計測に向けた一つの方法であると考えられる。

わが国における ALS の森林計測への応用はまだ始まったばかりであり, 今後このような計測を積み重ねていくことにより, それぞれの林分に適した計測パラメータが明らかになっていくと考えられる。今後, ALS を用いた森林計測では, 計測費用を抑えながら, すなわち, 低いレーザー光の地上照射密度で広域の森林資源量を精度よく推定する手法(瀬戸島ら, 2002)と, 非常に高密度のレーザー光の照射による垂直面での林冠一下層植生一地形という森林の内部構造を把握する手法 (Hirata *et al.*, 2003a, b) の開発が求められている。また, ハイパースペクトルセンサー等の併用により, より高度な情報の取得が可能となる。これらの技術の実用化に向けては, そこから得られる森林資源情報の精細性と広域性に加えて, 費用対効果を如何に上げられるかが重要である。

最後に本研究を遂行するにあたり, 森林総合研究所の酒井 敦氏, 倉本恵生氏, 日高健治氏, 自然環境研究センターの市河三英氏, 佐藤香織さんには現地での毎木調査にご協力いただいた。また, 航空機レーザースキャナーによる計測およびデータの前処理において, 朝日航洋(株)の秋山幸秀, 岩村一紀, 大森康至諸氏にご尽力いただいた。心より感謝を申し上げる。

なお, 本研究での計測は, 農林水産省委託プロジェクト研究「流域圏における水環境・農林水産生態系の自然共生型管理技術の開発(自然共生イニシアティブ)」において実施したものである。

引用文献

- 秋山幸秀 (1999) 航空機搭載型レーザー測量システム ALMAPS (アルマップス). 北海道土地改良設計技術協会報文集 13 : 1-12.
- Brandtberg, T., Waner, A., Landenberger, R.E., and McGraw, J.B. (2003) Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sens. Environ.* 61 : 246-253.
- Chen, J. and Abe, N. (1999) Site classification for sugi plantations using GIS. *J. For. Plann.* 5 : 1-8.
- 古家直行 (2004) 単木樹冠. (森林リモートセンシング. 加藤正人編, 273 pp, 日本林業調査会, 東京). 150-153.
- Hirata, Y. (2004) The effects of footprint size and sampling density in airborne laser scanning to extract individual trees in mountainous terrain. *In* Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 “Laser-scanners for forest and landscape assessment”. Thies, M., Koch, B., Spiecker, H., and Weinacker, H. (eds.), 344 pp, Freiburg Univ., Freiburg, 102-107.
- Hirata, Y., Sato, K., Sakai, A., Kuramoto, S., and Akiyama, Y. (2003a) The extraction of canopy-understory vegetation—topography structure using helicopter-borne LIDAR measurement between a plantation and a broad-leaved forest. *In* Proceedings of IGARSS 2003. IEEE, Toulouse. 5 : 3222-3224.
- Hirata, Y., Akiyama, Y., Saito, H., Miyamoto, A., Fukuda, M., and Nishizono, T. (2003b) Estimating forest canopy structure using helicopter-borne LIDAR measurement. *In* Advances in forest inventory for sustainable forest management and biodiversity monitoring. Corona, P., Köhl, M., and Marchetti, M. (eds.), 441 pp, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,

- 125-134.
- Hirata, Y., Sato, K., Shibata, M., and Nishizono, T. (2003c) The capability of helicopter-borne laser scanner data in a temperate deciduous forest. *In* Proceedings of the Scandlaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanner of forest. Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H., Granqvist, P.T., and Resse, H. (eds.), Sweden Univ. of Agri. Sci., Umea, 174-179.
- 平田泰雅 (2005a) 航空機レーザースキャナーを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響. 森林計画誌 11: (印刷中).
- 平田泰雅 (2005b) 航空機レーザースキャナーの森林計測への適用とその可能性. 山林 1455: 70-75.
- Hyypä, J. and Inkinen, M. (1999) Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogram. J. Finl.* 16: 27-42.
- Hyypä, J., Kelle, O., Leikoinen, M., and Inkinen, M. (2001) A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-d tree height models produced by laser scanners. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39: 969-975.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., and Maltamo, M. (2004) Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. *In* Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 "Laser-scanners for forest and landscape assessment". Thies, M., Koch, B., Spiecker, H., and Weinacker, H. (eds.), 344 pp. Freiburg Univ., Freiburg, 82-89.
- 関西地区林業試験研究機関連合協議会立地部会 (1989) 関西地域におけるヒノキの成長調査. 35 pp, 関西地区林業試験研究機関連合協議会立地部会, 京都.
- 片桐成夫 (1996) 異なる立地での物質生産と養分循環. (森林生態学. 岩坪五郎編, 306 pp, 文永堂出版, 東京). 224-257.
- 加藤正人 (2002) 高分解能 IKONOS 画像による単木判読可能性の比較. 日林誌 84: 221-230.
- 小林裕之 (2002) SA 解除後の森林内外での単独測位と DGPS の比較試験. 日林誌 84: 276-279.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., and Spies, T.A. (2001) An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. *Can. J. For. Res.* 31: 78-87.
- Maclean, G.A. and Krabill, W.B. (1986) Gross-merchantable timber volume estimation using airborne lidar system. *Can. J. Remote Sens.* 12: 7-18.
- Magunussen, S. and Boudewyn, P. (1998) Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile. *Can. J. For. Res.* 28: 1016-1031.
- Magunussen, S., Eggermont, P., and LaRiccia, V.N. (1999) Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Sci.* 45: 407-422.
- 真下育久・橋本与良・宮川 清 (1958) スギ・ヒノキの成長と土壌条件. 林野土壌調査報告 9: 17-43.
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., and Hendrix, C.J. (2000) Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogr. Eng. Remote Sens.* 66: 1367-1371.
- Mitsuda, Y., Yoshida, S., and Imada, M. (2001) Use of GIS-derived environmental factors in predicting site indices in Japanese Larch plantations in Hokkaido. *J. For. Res.* 6: 87-93.
- Næsset, E. (1997) Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogr. Remote Sens.* 52: 49-56.
- Næsset, E. and Bjerknes, K.-O. (2001) Estimating tree heights and number of stems in young stands using airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.* 78: 328-340.
- Nelson, R., Krabill, W., and Tonelli, J. (1988) Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sens. Environ.* 24: 246-267.
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司 (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(4): 34-46.
- Persson, Å., Holmgren, J., and Söderman, U. (2002) Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogr. Eng. Remote Sens.* 68: 925-932.
- 沢田治雄 (1995) リモートセンシング技術による森林資源・環境のモニタリングシステム. 林業技術 636: 8-10.
- 瀬戸島政博・赤松幸生・船橋 学・今井靖晃・天野正博 (2002) 航空機レーザースキャナーによる森林域の計測とその適用性. 写真測量とリモートセンシング 41(2): 15-26.
- Takahashi, T., Yamamoto, K., Senda, Y., and Tsuzuki, M. (2005) Estimating individual tree heights of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations in mountainous areas using small-footprint airborne LiDAR. *J. For. Res.* 10: 135-142.
- 田村正行・高槻幸枝 (2000) 航空機レーザースキャナーによる樹高計測. 写真測量とリモートセンシング 39(2): 8-13.
- 寺岡行雄・増谷利博・今田盛生 (1991) 森林経営のための地位指数推定方法—地形図上で判読可能な地形因子による樹高の推定—. 九大農芸誌 45: 125-133.
- 露木 聡 (1995) 日本における森林資源の調査と環境モニタリング—リモートセンシング技術の利用のために—. 森林計画誌 25: 73-76.
- 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高計測と材積・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.
- Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., and Maltamo, M. (2004) Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. *In* Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 "Laser-scanners for forest and landscape assessment". Thies, M., Koch, B., Spiecker, H., and Weinacker, H. (eds.), 344 pp, Freiburg Univ., Freiburg, 96-101.