
これからの 大学等 研究施設

第3編「環境科学編」

監修 有馬 朗人

社団法人 文教施設協会
株式会社 科学新聞社

6.4.3 森林の構造とバイオマスの3次元リモートセンシング

東京大学大学院農学生命科学研究科教授 大政 謙次

(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する研究が盛んに行われるようになってきた^{1,2)}。

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^{1,3)}。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^{4,6)}。

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、樹木の胸高直径の巻き尺による測定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⁷⁾。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^{8,11)}。

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、研究設備としてのSLと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^{4,6,9,10)}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

航空機ライダーによる観測は、1960から1970年代に海洋の水深計測の分野で発達した。その後、1980年代になって、陸域の地形図作成の分野に応用され始めた。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利用され始めた。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¹²⁾。

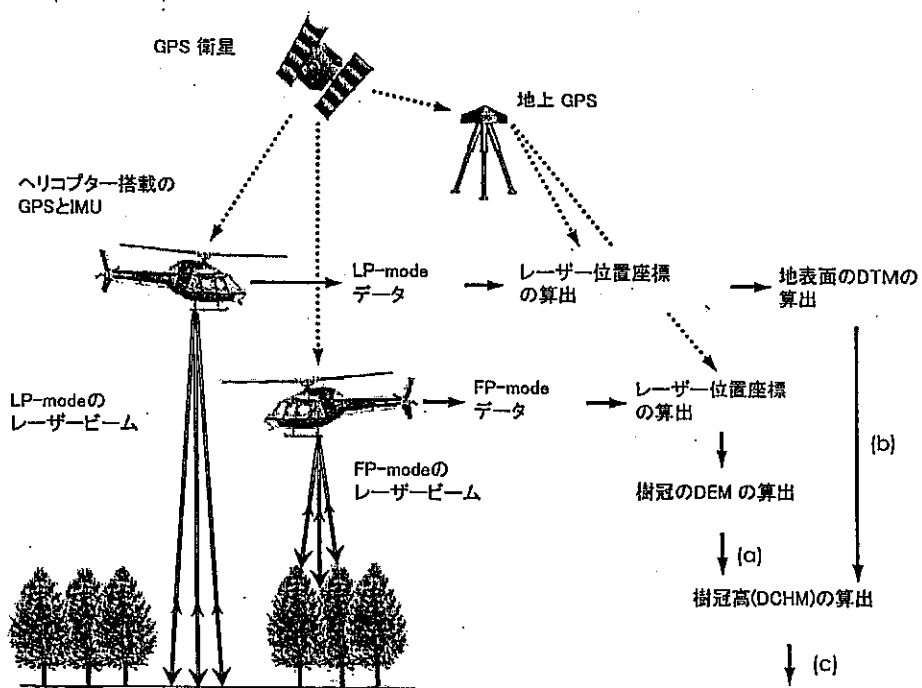
1990年代の中頃になると、飛行方向に直角に、パルスレーザーをスキャン照射し、地形や樹高を計測するSLシステムが使用され始めた^{13,15)}。しかし、スキャン間隔が粗く、地上でのビーム径 (Footprint) が1 m以下になると、地表面や平均樹高の正確な計測が難

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、人工衛星からの地球表面の観測ということもあって、25mのビーム径のものが搭載される予定になっている。この計画に関連して、航空機からの試験観測が実施されているが、最近、25mのビーム径内における地表面からの反射データを密に観測することにより、1 m程度の空間解像度で大きな樹木の樹冠高を計測する試みもなされている⁵⁾。

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⁴⁾。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。また、図2に観測用ヘリコプターの写真を示す。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みると、距離計測の精度である15cm以内である。

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3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、アオキーイロハモミジ群落、コナラ群落、オオバーヤシャブシ群落が広がっていた。

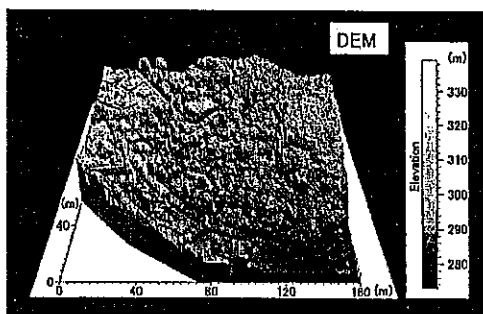
一方、LP-modeは、レーザー光が反射して最後に戻ってくるパルスを受信するモードであるので、樹間を通して地表面までパルス光が到達した場所では、地表面の標高を与える。このため、このモードにより得られるデータにおいて、周辺に比べて標高が特に低い場所を抽出し、補間処理をすることにより、地表面の形状 (地形、建物を含む) を示す標高メッシュデータ (DTM; Digital Terrain Model) (図1(b)参照) を得ることができる。図4はLP-mode DEMから推定されたDTM (建物を含む) を鳥瞰図として示したもので



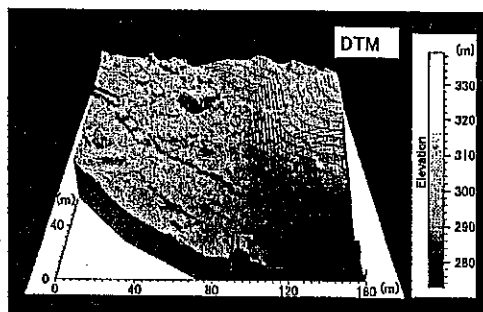
6.4.3 図1 ヘリコプター搭載の高空間分解能SLシステムによる地表面と樹冠高の3次元リモートセンシングの概念図⁴⁾



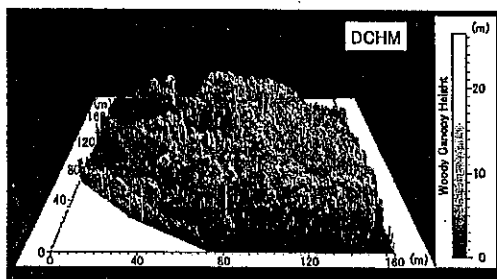
6.4.3 図2 高空間分解能スキャングライダーを搭載したヘリコプター



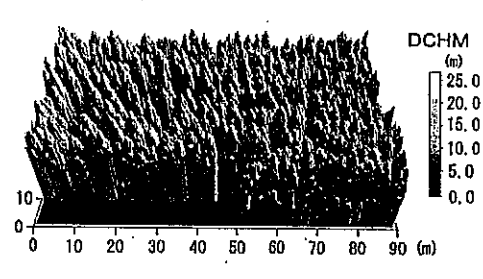
6.4.3 図3 谷間の地域のFP-mode DEMの鳥瞰図⁴⁾



6.4.3 図4 LP-mode DEMから推定されたDTM(建物を含む地表面)の鳥瞰図⁴⁾



6.4.3 図5 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⁴⁾



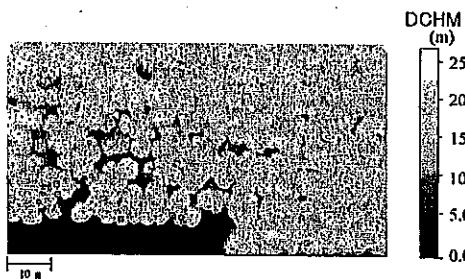
6.4.3 図6 スギ林のDCHM(樹冠高)の鳥瞰図⁴⁾

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。

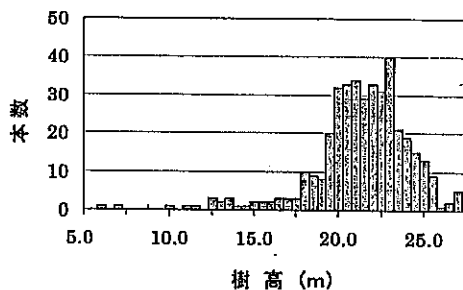
図5はFP-mode DEMからDTMを引くことによって求められた樹冠高のメッシュデータ(DCHM; Digital Canopy Height Model)(図1(c)参照)の鳥瞰図である。山や谷、建物などの部分が除かれ、平地に樹木が生育しているように表示されている。この鳥瞰図から、樹冠の形や樹木の高さがわかる。個々の樹木において、針葉樹で47cm、広葉樹で40cmの誤差内での計測が可能であった。また、RMSEでみると、針葉樹で19cm、広葉樹で12cm程度の誤差であった。なお、DCHMの算出の際に、ノイズ除去のために3 x 3メッシュのメディアンフィルター処理を行った。

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6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7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8は、図7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。

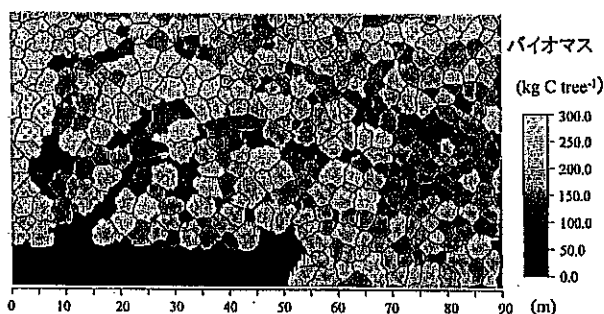
一般に樹木の幹材積の推定には、樹高と胸高直径の関数である材積式が用いられる。幹材積に全乾比重0.35を掛けると乾物重量が求まり、その乾物重量に0.45を掛けると幹の炭



6.4.3 図7 スギの頂点とDCHMの合成画像⁶⁾
 +: 頂点, ○: 未検出, □: ノイズ



6.4.3 図8 図7における検出されたスギ394本の樹高のヒストグラム⁶⁾



6.4.3 図9 個々のスギの樹冠形状と全バイオマス(炭素重量)⁶⁾

素重量 (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_{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 (CBFR) 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9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 kg C tree^{-1} であった。

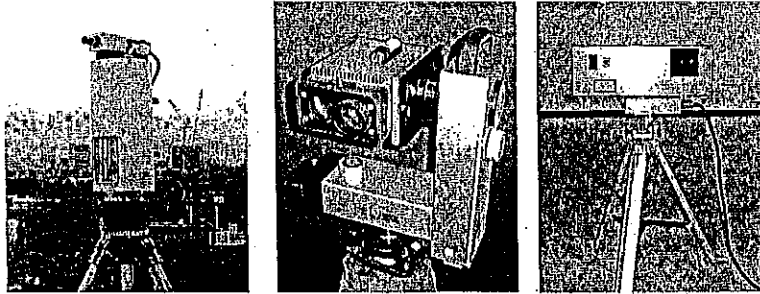
以上の結果から、小さなビーム径のヘリコプター搭載SLシステムを用いて、地表の観測面を漏れなくスキャン計測することにより、地形や樹冠の標高を正確に計測できることがわかった。また、計測された樹冠高を解析することにより、樹冠の形状やバイオマス(炭素重量)を精度よく求めることができた。

(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^{9, 10, 11)}。

図10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



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

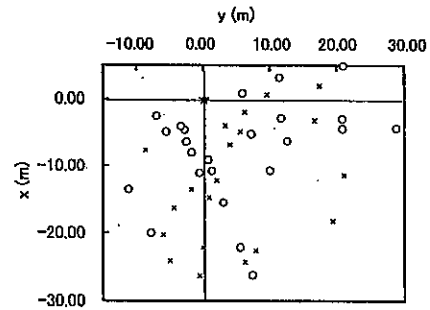
Time-of-flight法
2-60m
8mm

光プローブ法
3.5-10m
0.5(3.5m)-5mm(10m)

6.4.3 図10 可搬型SLの例



6.4.3 図11 可搬型SLを用いたカラマツ林の距離画像の計測例⁹⁾



6.4.3 図12 カラマツ林の樹木位置のマッピング⁹⁾

○: 樹幹径計測可能, X: 樹幹径計測不可能

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11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2m~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20m離れた地点で直径約20mmであった。

図12は、図11に示した距離画像から検出できるカラマツの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カラマツ(24本)と幹径が計測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、樹幹径が計測できたカラマツは、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%

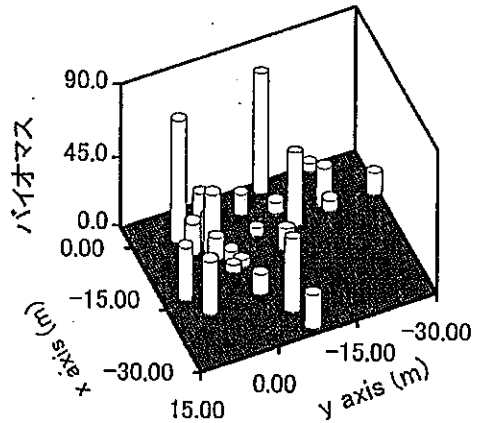
(17本)、30m以内で25% (24本) であった。また、樹幹径が計測できなかったものも含めると、10m以内で100% (計測可能本数=14本)、15m以内で83% (24本)、20m以内で66% (29本)、30m以内で45% (44本) であった。この数字をどのように評価するかは意見が分かれるが、自然の生育状態で生育している樹木を林床植物の攪乱なしに、一カ所からの計測で求められること、また、踏査では困難な樹木の正確な位置を知ることができるという点で優れている。

次に、個々のカラマツのバイオマス (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、対象とするカラマツ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本のカラマツの地上部バイオマスを推定した (図13)。24本のカラマツの炭素重量は、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13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13において、可搬型SLからの距離が10m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342kgC、20m以内のカラマツ17本 (39%) のバイオマスは648kgC、30m以内のカラマツ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、10m以内で、炭素重量で3059kgCm⁻²、20m以内で2.83 kgCm⁻²、30m以内で2.80kgCm⁻²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、カラマツ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2.58 kgCm⁻²、20m以内で2094 kgCm⁻²、30m以内で2.88kgCm⁻²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、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たら、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



6.4.3 図13 個々のカラマツの地上部バイオマス (炭素重量)⁹⁾

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。

(4) おわりに

ここでは、研究設備としてのSLとして、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, 東京
- 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) Goward, S.N. and D.L. Williams. (1997) Photogramm. Eng. Remote Sens. 63 : 887-900
- 4) 大政謙次他（2000）日本リモートセンシング学会誌 20 : 34-46
- 5) Lefsky, M.A. et al. (2002) BioSci. 52:19-30.
- 6) Omasa, K. et al. (2002) Environ. Sci. Technol. 37 : 1198-1201
- 7) 大隅眞一（編）（1995）森林計測学講義, 養賢堂
- 8) 吉村充則（2001）科学 71 : 1210-1216
- 9) 大政謙次他（2002）日本リモートセンシング学会誌 22 : 550-557
- 10) 浦野 豊・大政謙次（2003）Eco-Engineering 15 : 79-85
- 11) 吉見健司・大政謙次他（2004）Eco-Engineering 16 : 203-207
- 12) Nelson, R. et al. (1988) Remote Sens. Environ. 24 : 247-267
- 13) Nilson, M. (1996) Remote Sens. Environ. 56 : 1-7
- 14) Nilsson, E. (1997) ISPRS J. Photogramm Remote Sens. 52 : 49-56
- 15) Nilsson, E. and T. Okland (2002) Remote Sens. Environ. 79 : 105-115