



森林

科学

[特集]

リモートセンシングでバイオマスを測る

シリーズ

林業遺産紀行

猪名川上流域の里山（台場クヌギ）について

森めぐり

宇都宮大学農学部附属演習林の森林認証

現場の要請を受けての研究

森林境界明確化支援システムの開発



No. **74**
June 2015

特集 リモートセンシングでバイオマスを測る

森林資源を測るリモートセンシングの最新事情 村上 拓彦	2
航空機 LiDAR と時系列衛星データによる 平均林冠高の推定 太田 徹志	5
航空機測量データを用いた針葉樹の 資源把握方法 大野 勝正	9
空中写真を利用した材積推定 大萱 直花	15
地上レーザーを用いた正確なバイオマス測定 加藤 顕	20

森林科学 No.74

2015年6月1日発行

頒 価 1,000円 (送料込み)

年間購読割引価格

2,500円 (送料込み)

編集人 森林科学編集委員会

発行人 一般社団法人 日本森林学会

102-0085 東京都千代田区六番町7

日本森林技術協会館内

郵便振替口座：00140-5-300443

電話 / FAX 03-3261-2766

印刷所 創文印刷工業株式会社

東京都荒川区西尾久7-12-16

表紙写真：上空から撮影した連続写真をコンピュータソフトで加工することにより、森林の3Dモデルをつくることのできるようになった。特集「リモートセンシングでバイオマスを測る」より (3ページ)

コラム 森の休憩室Ⅱ 樹とともに

街路樹を考える 25

二階堂 太郎

シリーズ 林業遺産紀行

猪名川上流域の里山(台場クヌギ)について 26

服部 保・林 義浩・遠矢 良宣・信田 修次

シリーズ 森めぐり

宇都宮大学農学部附属演習林の森林認証 28

大島 潤一

シリーズ うごく森

スギ・ヒノキ枯死木内における3種の寄生バチの

「動向」一寄主を殺すか、生かしておくか 30

浦野 忠久

シリーズ 森をはかる

34 非破壊で生立木の腐朽をはかる

山田 利博

シリーズ 現場の要請を受けての研究

36 森林境界明確化支援システムの開発

小林 裕之

40 Information

ボックス

北から南から

森林資源を測るリモートセンシングの 最新事情

村上 拓彦 (むらかみ たくひこ、新潟大学)

リモートセンシングの今

加藤正人教授（信州大学）編集の「森林リモートセンシング第4版」¹⁾が2014年4月に発刊された。初版である「森林リモートセンシング」が発行されたのが2004年である。たかだか10年前のことであるが、その当時掲載されている内容は光学リモートセンシング、特に中分解能、高分解能の人工衛星のデータの解析事例が大半であった。当時はALOS（だいち）が打ち上がる前というタイミングでもあったため、光学リモートセンシング中心の構成であった。あらためて初版と第4版を比べると大きく変わった部分があり、それが航空レーザー計測とUAVである。リモートセンシングと言えば人工衛星という図式は今も色褪せていないが、ここ10年、森林分野ではLiDAR、UAVが新しい技術として知名度を上げてきた。また、SfM技術によって写真測量が気軽になりつつある。空中写真も以前はフィルムタイプのアナログ形式であったが、この10年の間にデジタルカメラの導入が一気に進んだ。森林の構造は単純に計測することが難しい不定形のオブジェクトで構成されている。それ故に、一瞬でありのままの森林の姿をキャプチャーすることのできる画像やレーザー計測に期待が集まる。古典的な測樹学は、まさに古典的な存在になっているが、森林を測る新しい道具（LiDARや地上型レーザー）の登場により、「樹木を計測すること（測樹学）」がまた新しい学問になったとも言える。例えば、地上型レーザーが記録する正確な点群データによって、伐り倒さなくても任意の断面の形状を把握することが可能となり、精密にバイオマスを計測することが可能になっている。

森林資源を測るリモートセンシング

社会におけるリモートセンシングの役割は種々様々であるが、今回テーマにした「バイオマスを測る」は森林分野で固有に求められている技術である。材積、バイオ

マスを測るということは森林資源を把握することである。この情報は、森林資源の持続可能性を確保するために収集しなければいけない最重要項目である。さらに、地球的関心事として炭素固定の場としての森林があり、バイオマス量の推定が大変な注目を集めている。特に、発展途上国における森林減少、森林劣化の抑制を目指すREDD+²⁾では炭素固定量の推定にリモートセンシングが不可欠な技術として位置付けられている。

既に述べたとおり、現在、一口にリモートセンシングと言っても、様々な方法が存在する。この特集では、読者の皆さまに、バイオマス推定を切り口に、様々な方法を紹介することを第一の目的とした。光学リモートセンシング、航空機レーザー計測、デジタル空中写真、地上レーザーについて、現在第一線にいる方々に執筆を依頼した。この特集でリモートセンシングの最新事情を把握することができるであろう。

原理、用語の解説

それぞれのトピックを紹介するにあたり、重要な技術や用語についてここで解説しておく。

航空機レーザー計測はLiDAR（Light Detection and Ranging）とも呼ばれている。航空機にレーザー計測用のセンサ（レーザー測距儀）を搭載し、地上に向けレーザーを照射する。地表面に当たったレーザー光は反射し、センサはその反射した光がどれぐらいの時間で戻ってきたのかを記録する。この時間は距離に換算することができ、航空機の位置（経度、緯度、高さ）が判明すれば、反射してきた場所の位置（経度、緯度、高さ）を確定することができる。図-1ではレーザーの照射と地物からの反射を模式的に表している。DSM（Digital Surface Model）、DTM（Digital Terrain Model）、DCHM（Digital Canopy Height Model）の関係についても述べておく。基本的に航空機レーザー計測で取得できるのは地物表面の高さ、すなわちDSMである。地

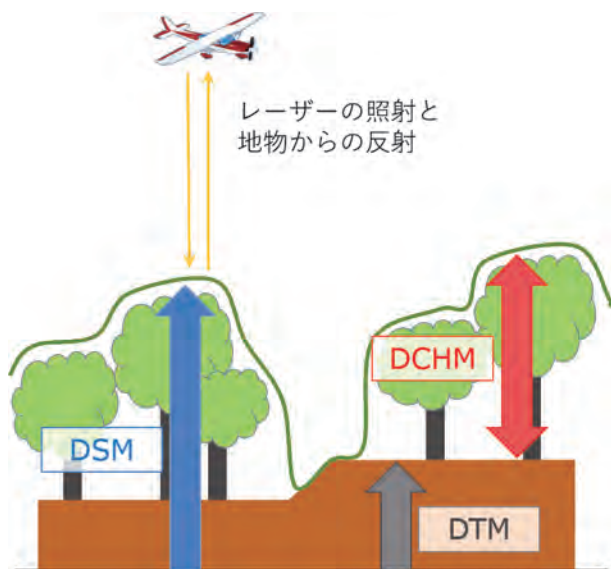


図-1 航空機レーザー計測の原理と DSM、DTM、DCHM

物が無い場所では地盤高(標高)そのものが計測できる。森林部分では、レーザーの一部が樹冠の間隙から林床に到達するため部分的に地盤高を計測することができる。この地盤高が DTM である。DSM から DTM を差し引くと地物の高さが得られることになり、森林部分では林冠高に相当する。これが DCHM である。

デジタル空中写真は、デジタル化した空中写真を意味するが、特にデジタルセンサにより取得された画像を指す。空中写真がデジタル化したことによる利点は様々であるが、従来型のフィルムで撮影された写真と異なり、近赤外域の情報が常に取得できる。近赤外域の情報は樹種の識別などに有利である。また、今回の特集でも扱うが、デジタルデータはコンピュータとの親和性が高く、三次元表示の装置を準備すれば、デジタル空中写真を用いてディスプレイ上で立体視が可能である。

SfM は Structure from Motion の略で、空中写真など複数の場所で撮影された画像データから物体の三次元形状を復元する技術である。最近、SfM ソフトが急速に普及しており、特に UAV (小型飛行機) で撮影した大量の画像データの処理において欠かせない技術となっている。図-2 は個別の画像データを SfM ソフトを介して 3D モデルに加工する模式図である。画像が単なる平面データとしてだけではなく、三次元情報として利用可能となると、材積推定やバイオマス推定への利用機会がますます増えるものと予想される。



図-2 SfM ソフトを介した 3D モデルの作成

地上レーザーは、上述の航空機レーザーと計測原理は同様である。レーザー光を物体に照射し、センサの周囲にある物体の位置を精密に記録することができる。森林の中で地上レーザーを使用することにより、短時間に樹幹の形状などが正確に計測され、バイオマスを高精度に計算することが可能となるだけでなく、これまで取得することのできなかった情報も収集することが可能となり、そのデータの活用方法に今後大きな期待が寄せられている。

特集の構成

今回、4つのトピックを準備した。太田徹志氏(九州大学)の「航空機 LiDAR と時系列衛星データによる平均林冠高の推定」では、限られた範囲になりがちな航空機 LiDAR データを Landsat データと関連付けることにより、広域スケールでのバイオマス推定を試みている。時系列 Landsat データを活用し、大量データからもっともらしい土地利用の変化を推定する点は興味深く、土地利用の変化が劇的である発展途上国において有効な手法である。大野勝正氏(アジア航測)の「航空機測量デー

タを用いた針葉樹の資源把握方法」では、針葉樹の材積推定に焦点をあて、空中写真や航空機レーザーを用いた手法が紹介されている。特に、航空機レーザーを用いた解析では林分レベル、単木レベルのアプローチがそれぞれ解説されており、航空レーザー計測の具体的活用方法を理解することができる。大萱直花氏（日本森林技術協会）の「空中写真を利用した材積推定」では、空中写真分析ソフト「もりったい」の紹介を軸として、ステレオペアで撮影された画像データを立体的に活用することの利点が示されている。誌面では、コンピュータディスプレイ上での立体視を読者の皆さまに伝えられないのが残念である。加藤頭氏（千葉大学）の「地上レーザーを用いた正確なバイオマス測定」では、地上レーザーを用いたいくつかの取り組みが紹介される。今回紹介するト

ピックで唯一上空ではなく、地上からの観測のものである。地上レーザーによる高精細な森林内のデータ収集は、間違いなく今後重要な技術となっていくであろう。

この特集をきっかけに一人でも多くの方々がリモートセンシングに興味を持っていただけると幸いである。

引用文献

- 1) 加藤正人編著 (2014) 森林リモートセンシング第4版. 日本林業調査会, 400pp.
- 2) 平田泰雅・鷹尾 元・佐藤 保・鳥山淳平編 (2012) REDD-plus Cookbook. (独) 森林総合研究所 REDD 研究開発センター, 152pp.

航空機 LiDAR と時系列衛星データによる 平均林冠高の推定

太田 徹志 (おおた てつじ、九州大学農学研究院)

はじめに

地上バイオマス量の推定に有効なリモートセンシング技術として航空機 LiDAR が挙げられる。航空機 LiDAR は航空機から照射するレーザーパルス光により地表の構造物を推定するもので、樹高や葉面積指数 (LAI) など様々な情報の収集に有効なことが報告されている。地上バイオマス量の推定に関する研究も豊富で、特に航空機 LiDAR から求めた平均林冠高 (MCH) を使うことで地上バイオマス量を高い精度で推定できることが示されている (たとえば Asner *et al.* 2012)。航空機 LiDAR による地上バイオマス量推定は精度が高く有効な手段だが、計測にかかる経費が高額である。そのため地上バイオマス量を求めたい範囲が広大な場合、全ての範囲を航空機 LiDAR で計測することが難しい場合もある。この問題を解決する手段として考えられる方法が、航空機 LiDAR と安価な衛星データの併用である。まず、対象範囲の一部で航空機 LiDAR の計測と地上バイオマス量の推定を行う。次に、航空機 LiDAR から求めた地上バイオマス量を目的変数、衛星データから求めたパラメータを説明変数とする統計モデルを作成する。作成した統計モデルを用いて航空機 LiDAR の計測範囲外の地上バイオマス量を推定することで、対象範囲全体の地上バイオマス量の推定を行う。

航空機 LiDAR と併用する衛星データには複数あるが、その中でも Landsat データは観測範囲が 180km と広いこと、空間分解能が数 10m と林分の状況を表すのに適切であること、無償であることなどの理由から有効な選択肢の 1 つである。土地被覆分類や林分構造の推定に関する研究も多く、地上バイオマス量の推定も多くの報告事例がある。過去の研究の多くは Landsat データから求めた林分の反射率や植生に関する指数から地上バイオマス量の推定を試みている。しかしながら、この手法は樹冠が閉鎖した林分での地上バイオマス量の推定が難しいことが示されており (Kajisa *et al.* 2009)、新

たな技術の開発が求められている。

森林の現況は過去の森林の攪乱の強度や攪乱からの経過年数などと密接に関連する。そのため、これらの情報を地上バイオマス量推定の変数として加えれば推定精度が向上する可能性が考えられる。近年、時系列の Landsat データから半自動的に攪乱の強度や攪乱の生じた時期を求める手法が開発されている。これにより地上バイオマス量などの推定に、攪乱に関する情報を容易に組み込める様になりつつ有る。本稿では、航空機 LiDAR と衛星データを併用した地上バイオマス量推定の実用化を目指して行われた、時系列 Landsat データによる MCH の推定に関する研究について紹介する。

対象地と使用データの概要と前処理

カンボジア王国コンポントム州内の国有林のうち 1632ha を研究対象地とした (図-1)。2012 年 1 月に航空機 LiDAR による対象地の計測を行った。計測した航空機 LiDAR データから、一般的な手法により、対象域内の数値標高モデル (DEM) を作成した。DEM と航空機 LiDAR のファーストパルスの差から各パルスの相対高を求めた。求めた相対高を Landsat データの空間分解能と合うよう格子状に集計して MCH を求めた。

Landsat データは 1983 年 12 月 1 日撮影のものから 2011 年 12 月 30 日撮影のものまで計 17 枚を使用した。全てのデータはアメリカ地質調査所 (USGS) の HP (<http://glovis.usgs.gov/>) よりダウンロードし、既往の研究に則って大気補正などの前処理を施した。前処理した Landsat データから、Tasseled Cap Angle (TCA) を求めた。TCA はピクセル内に含まれる植生の割合を示す指標であり、値が高いほど高い植生率を示す。この TCA を攪乱に関する情報を求める際の指標とした。

今回は Landsat データに対して筆者が前処理を施したが、2015 年 3 月現在では、USGS の異なる HP ([森林科学 74 2015.6](http://</p></div><div data-bbox=)

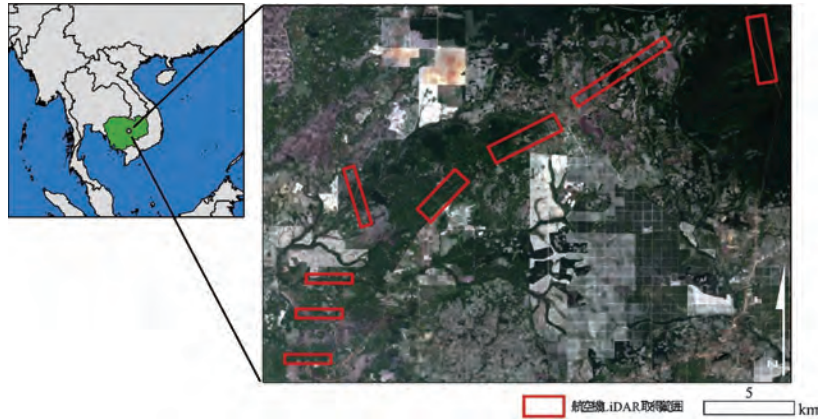


図-1 対象とした地域.

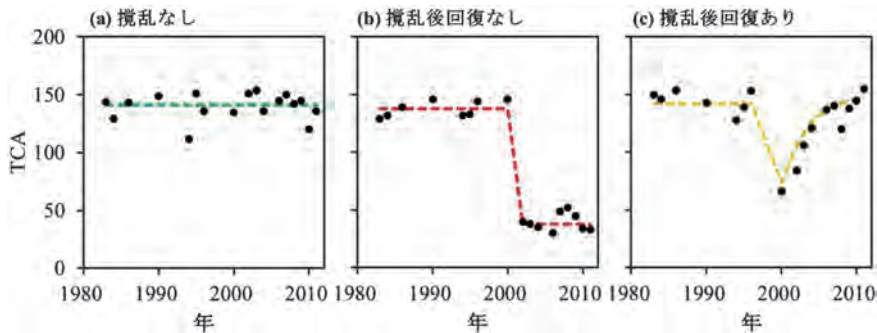


図-2 攪乱に関する情報を計算するための概念図. (a) 攪乱なし、(b) 攪乱後回復なし、(c) 攪乱後回復あり (Ota *et al.* 2014 を改変)

espa.cr.usgs.gov/) より大気補正などの前処理済みの Landsat データを無償にて入手できる。ただし、全ての Landsat データが前処理済みで入手できるわけではない。この辺りの詳細については、上述の HP を参考にしたい。

時系列衛星データを用いた攪乱に関する情報の把握

時系列衛星データから攪乱に関する情報を求める方法はいくつか提案されている。今回は、Kennedy *et al.* (2007) が提案した手法を用いた。以下に概略を述べるので、詳細については Kennedy *et al.* (2007) を参照して欲しい。

研究対象地内の任意の地点に存在する森林に着目する。この地点における時系列 Landsat データの撮影年を横軸、時系列 Landsat データから求めた各年の TCA を縦軸とした図を考える (図-2)。この地点の森林が老齢林で、かつ森林のまま変化しない場合、TCA の値は年を経てもほとんど変化しないはずである (図-2a)。一方で、森林が伐採された場合、その後植生が回復しな

い (例えば道路などへの転換) ならば TCA は伐採年で減少し、その後 TCA は低いままで維持されるだろう (図-2b)。森林が伐採された後植生が回復したならば TCA は伐採年で減少し、その後 TCA は徐々に上昇すると予想される (図-2c)。このように、森林の攪乱とその後の回復の有無などにより TCA の描く軌跡は異なる。Kennedy *et al.* (2007) の方法は、まず攪乱と植生回復の有無などから攪乱の種類を定義する。定義した攪乱の種類ごとに、TCA が描くであろう軌跡を仮定する。仮定したそれぞれの軌跡がどれだけ忠実に実際の TCA の変化を再現出来ているか、非線形回帰分析を使って計算する。計算の結果 TCA の変化を最も忠実に再現出来た軌跡から、その地点の攪乱の種類や攪乱の生じた年、攪乱直後の状態などを求める。

今回は、①攪乱の後に植生回復なし、②攪乱の後に植生回復、③植生回復、④植生回復の後に安定状態の 4 つの攪乱の種類を定義した。どれにも当てはまらない場合には攪乱なしとした。定義した 4 つの内、①と②は時系列 Landsat データの撮影期間中 (1983 年 12 月 1

リモートセンシングでバイオマスを測る

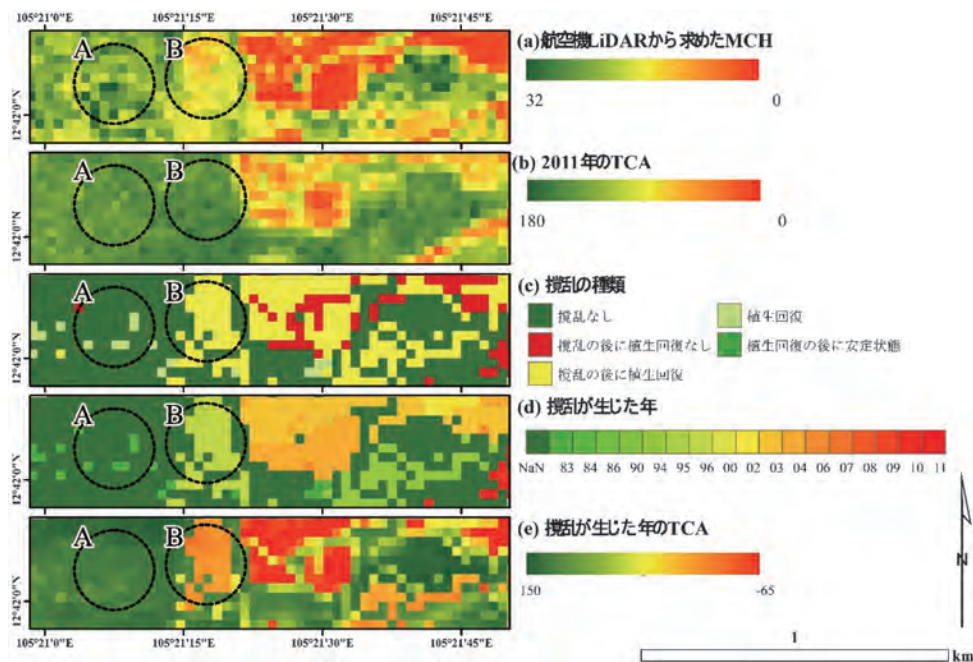


図-3 MCH、TCA、攪乱に関する情報の例。(a) 航空機 LiDAR 由来の MCH、(b) 2011 年の Landsat データから求めた TCA、(c) 攪乱の種類、(d) 攪乱が生じた年、(e) 攪乱が生じた年の TCA (Ota *et al.* 2014 より引用)

日～2011年12月30日)に攪乱が生じ、その後の回復の有無が異なるものである。③と④は時系列 Landsat データの撮影年より前に既に攪乱が生じており、時系列 Landsat データの撮影期間中は回復傾向にあるものである。非線形回帰にて攪乱の種類を決定した後、攪乱が生じた年と攪乱直後の TCA の値を求めた。③と④については、時系列 Landsat データの撮影期間より前に攪乱が生じているので、攪乱が生じた年と攪乱直後の TCA を求めることができない。そこで時系列 Landsat データの最初の年、すなわち 1983 年を攪乱が生じた年とみなし、この時の TCA を攪乱直後の TCA とした。

図-3にMCH、2011年のTCAおよび攪乱に関する情報の例を示す。図-3aに示すのが航空機LiDARから求めたMCHである。MCHが低い場所は赤色で、高い箇所は緑色で示している。円で囲んだ2つの箇所(AとB)を見比べて欲しい。Aに比べてBのMCHが若干低い事が分かる。図-3bに示すのは、同じ範囲の2011年におけるTCAの値である。ここでもTCAが低い場所は赤色、高い箇所は緑色で示している。先ほどと同様にAとBを比較すると、共に緑色でありAとBにほとんど差がない。このことから、2011年のTCAだけではAとBのMCHの違いは見分けられないと言

える。図-3cから図-3eに示すのは、Kennedy *et al.* (2007)の方法で求めた攪乱に関する情報である。図-3cよりAの地点では1983年以降攪乱は生じていないことが確認できる。一方でBの地点は1996年ごろに攪乱が生じ回復過程にある箇所であることが確認できる(図-3c、3d)。この例が示すように、時系列のLandsatデータから攪乱の情報を求めることで、単年のLandsatデータでは見分けのつかなかった森林の状態の違いについても把握できるようになる。

平均林冠高の推定

MCHの推定に用いる説明変数には、1) 2011年のLandsatデータから求めた林分の反射率や植生に関する指数を用いた場合(以下、単年データのみ)、2) 攪乱に関する情報のみ用いた場合(以下、攪乱情報のみ)、3) 反射率や植生に関する指数と攪乱に関する情報の両方を用いた場合(以下、単年データ+攪乱情報)の3組を試した。また、推定の手法には回帰分析とランダムフォレストと呼ばれる手法の2種類を試した。ここで回帰分析は、林分構造推定のために従来用いられてきた方法である。ランダムフォレストは、決定木を利用した集団学習アルゴリズムの1つであり、回帰分析に比べると比較的新しい手法である。

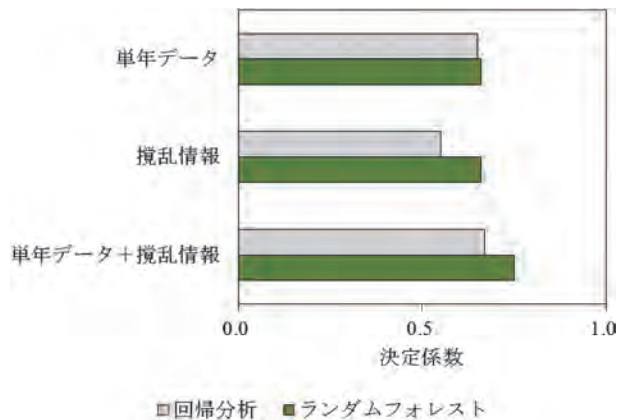


図-4 MCHの推定結果。(Ota *et al.* 2014 より作成)

図-4にMCHの推定の決定係数を示す。まず回帰分析を利用した場合に着目して、説明変数と推定精度の関係を検討する。攪乱情報のみを利用した場合の決定係数が0.55で3組の中で最も低くなった。単年データのみの決定係数が0.65、単年データ+攪乱情報の場合の決定係数が0.67であり、この2つの精度はほとんど変わらなかった。このことから、回帰分析を推定手法に用いた場合、攪乱に関する情報は有効ではなく、精度向上が見込めないとと言える。次に、ランダムフォレストを利用した場合に着目する。攪乱情報のみを利用した場合と単年データのみの場合の決定係数は0.66、単年データ+攪乱情報の場合の0.75となり、単年データ+攪乱情報の場合の精度が最も良くなった。

単年データを用いた場合、回帰分析とランダムフォレストのいずれを用いたとしても、決定係数は0.65程度だが、単年データに攪乱に関する情報を加え、ランダムフォレストを用いることで、決定係数を0.1程度向上させることができる。以上のことから、攪乱に関する情報はMCHの推定に有効であると言える。また、今回の結果から、攪乱に関する情報を有効に利用する上で2つ重要な点があることが示唆された。まず、1つ目は、林分の反射率や植生に関する指数と併用する必要がある点である。単年データ+攪乱情報の場合、他のデータセットよりも推定精度は高くなった。しかし、攪乱に関する情報のみでMCHを推定した場合、単年データの場合と同程度の結果か、むしろ下回る結果となった。つまり、攪乱に関する情報は単年データより優れるというわけではない。攪乱に関する情報は、単年データの補助情報と捉えるべきであり、単体で使う事は望ましくないと見える。2つ目は、推定に用いる手法の選択が重要という点

だ。単年データ+攪乱情報の場合でも、回帰分析を用いて推定した場合は、推定精度はあまり向上しない。ランダムフォレストを用いることで、初めて有効に活用できる。今回は、回帰分析に代わる手法としてランダムフォレストのみを検討したが、回帰分析に代わる手法は他にも様々開発されている。ランダムフォレストより有効な推定手法が有る可能性も有るので、今後検討の余地があるだろう。

まとめ

本稿では、地上バイオマス量をより効率的に推定することを目指して行われた、時系列LandsatデータによるMCHの推定に関する研究について紹介した。時系列Landsatデータから求めた攪乱に関する情報をMCHの推定に利用することで、従来の手法と比べ決定係数が向上することを示した。本稿ではMCHの推定のみにとどまったが、MCHは地上バイオマス量との間に高い相関が有ることが示されている。よって、今回の結果を拡張し、時系列Landsatデータによる地上バイオマス量の推定を行いたいと考えている。

なお本稿は、農林水産省農林水産技術会議委託プロジェクト「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のためのプロジェクト」による成果である。

引用文献

- Asner GP *et al.* (2012) High-resolution mapping of forest carbon stocks in the Colombian Amazon. *Biogeosciences* 9: 2683-2696.
- Kajisa T, Murakami T, Mizoue N, Top N, Yoshida S (2009) Object-based forest biomass estimation using Landsat ETM+ in Kampong Thom Province, Cambodia. *J For Res* 14: 203-211.
- Kennedy RE, Cohen WB, Schroeder TA, (2007) Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sens Environ* 110: 370 – 386.
- Ota T *et al.* (2014) Estimation of Airborne Lidar-Derived Tropical Forest Canopy Height Using Landsat Time Series in Cambodia. *Remote sensing* 6: 10750-10772.

航空機測量データを用いた針葉樹の 資源把握方法

大野 勝正 (おおの かつまさ、アジア航測株式会社)

1. はじめに

近年の目覚ましいリモートセンシング技術の発展により、空から（航空機測量データを用いて）針葉樹の資源量を把握することが一般的になりつつある。林業従事者の減少、木材自給率の回復という背景を考えると今後はさらにリモートセンシング技術による資源量把握の必要性が高まるようになって考えられる。しかしながら、航空機測量データの活用方法や注意点などについてまとめた情報は乏しいことから、これまでの解析事例を基に針葉樹の資源把握方法についてまとめる。

2. 現地調査方法

これまでの現地調査では小班全域の資源量を推定するための標準地調査などが行われてきたが、航空機計測データを利用する資源把握では精度検証や回帰式の作成のために現地調査が行われる。両者の調査は異なる目的であることから、調査地の選定、面積や調査方法などに若干の違いがある。例えば、標準地調査では小班の資源量を把握することが目的であることから、小班の縮図となるように小班の樹種構成や樹高などを考慮して平均的な箇所を標準地として設定する。一方、航空機測量データ用の現地調査では、検証や回帰式を作成することを目的としているため、対象地の立木密度が疎から密まで分

布する場合には、密度分布に合わせ調査結果のばらつきが得られるように調査地点を配点することが重要になる。このようにこれまでとは異なる視点での現地調査が必要になり、現地調査の質が航空機測量データの解析精度に影響を与えることに留意する必要がある。航空測量データ用の現地調査の注意点をまとめると以下のようになる。

- ① 調査対象地の森林を網羅的に表現できるように、林齢、樹高、立木密度などの値域に対して均等かつばらつきがあるように調査地点を配点する。
- ② 調査地点の平均値を検証や回帰式などに利用することから、1点1点の調査結果のばらつきが小さくなるように純林かつ樹高などが均質な林分を選定する。
- ③ 航空機測量データとの比較では位置の特定が重要となるため、GPSで調査位置を記録するだけでなく、GPSの軌跡ログも取得する。

また、現地調査の樹高と航空測量の樹高では測り方が異なるため、樹木に倒れ込みがあると誤差が生じる。パーテックスを用いた樹高計測では胸高位置から鉛直上方に樹頂点があることを前提に樹高が計測されるが、航空測量では樹頂点の直下の地盤との差分から樹高が計算される（図-1左図）。このため、樹木が谷側に倒れ込んで

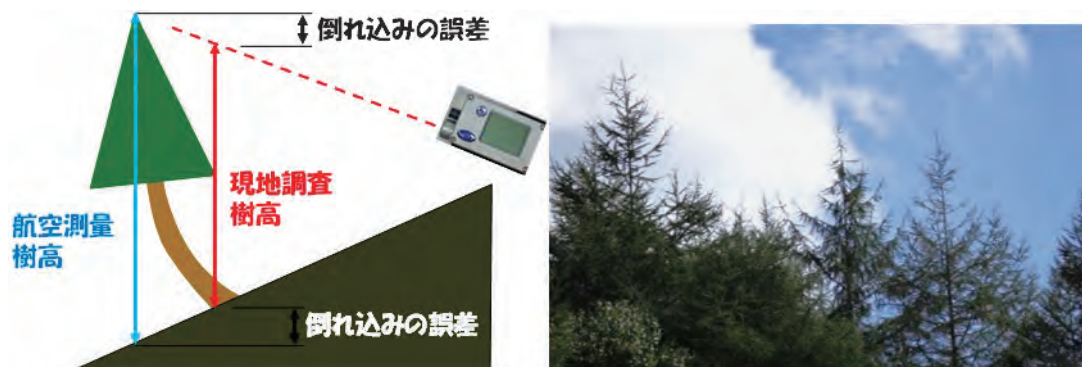


図-1 樹高計測の誤差要因

表-1 空中写真測量とレーザー計測の比較

	利点	欠点
空中写真測量	<ul style="list-style-type: none"> 視覚的で汎用性が高い 立体視が可能 撮影費用が安価 	<ul style="list-style-type: none"> 影などの影響で識別困難領域が生じる 地盤標高の取得が困難
レーザー計測	<ul style="list-style-type: none"> 林内の3次元構造が把握できる 高さ精度が高い 地盤標高が取得可能 	<ul style="list-style-type: none"> フライトコースが多く、時間と費用がかかる

いる場合、図-1 左図のように航空測量の樹高が高くなり、逆に、樹木が山側に倒れ込んでいる場合、倒れ込みの誤差は逆に生じて航空測量の樹高が低くなる傾向がある。また、樹頂点の位置の特定によっても誤差が生じる。現地調査では樹頂点の先端(図-1 右写真)が認識できるが、航空測量では樹頂点の細い先端を特定することが困難であることから航空測量の樹高は低くなる傾向がある。

3. 針葉樹の資源量把握方法

航空機測量データを用いた資源把握では、使用するデータから空中写真測量とレーザー計測の2つに大別される。それぞれの特徴を表-1にまとめる。空中写真測量はこれまで目視判読により人為的に高さ情報を取得することが一般的であったが、近年は3次元モデル生成ソフト(SfM: Structure from Motion)により、自動処理で3次元マッチングを行い、レーザー計測と同様に樹冠表層標高(DCSM: Digital Canopy Surface Model)を取得できるようになってきた。しかしながら、空中写真は天候(光)条件により影になる領域が生じること、3次元マッチングの精度はソフトに依存することから、樹高の精度や林内のギャップ、林縁部などの形状の再現性に課題が残る。一方で、レーザー計測は複数の反射パルスを取得することで、反射パルスの垂直分布を解析することにより林分の垂直構造(単層・複層構造)を把握したり¹⁻³⁾、樹冠のうっ閉度を評価したり⁴⁾することができる。

3.1 空中写真を用いた森林資源把握

空中写真により樹頂点の位置を識別する必要があるため、最低でも50cm解像度が必要になり、さらに、3次元モデルを作成する場合には25cmより高い解像度で撮影されることが望ましい。空中写真を用いた資源把握手法は大きく2種類に分けられる。1つが従来から行われてきた立体視による目視判読で行う手動の資源把握

手法、もう1つは3次元データ自動生成SfMソフトによる自動処理による資源把握手法である。以下に両者の特徴をまとめる。

3.1.1 3次元立体視による資源把握

アナログ空中写真からデジタル空中写真に代わり、写真データをパソコンに取り込んで立体視ソフトにより簡単に目視判読で樹高の計測ができるようになってきた。また、立体視メガネや3次元モニタにより誰でも立体視による樹高計測が行える環境となってきた。立体視ソフトにより樹木本数と樹高の計測が行えることから、密度管理図を利用して材積を把握することができる。しかしながら、1本1本の樹木を目視で識別し、地盤標高を計測できないような箇所での樹高計測は多大な労力と時間を要求する。また、人為的な作業であることから、樹高計測などの結果は作業者の熟練度や個人差が影響し、計測精度にばらつきが生じる可能性がある。さらに、対象範囲が広い場合、対象となる樹木を全数計測することは困難であることから、サンプルでの調査となり、小班全域を推定した結果、資源量に誤差が生じる可能性がある。一方で、過去のアナログ写真をスキャンし、デジタル化することで、立体視ソフトで撮影当時の樹高計測をしたり、位置情報を持つ境界線を引いたりすることができる。これにより、現存林分の樹高成長量の把握や、過去の植林時などの林況を考慮した境界確定などの課題に寄与することが期待されている。

3.1.2 3次元データ自動生成SfMソフトによる資源把握

ここ数年、急速に発展してきたSfMソフトにより空中写真の活用方法が一変した。位置情報を持たずともラップ率の高い写真を使用することで、SfMソフトが自動的に写真間のマッチングを行い、3次元のモデルを作成することができる。ただし、モデルは作成できるものの、位置座標が特定できないため、相対的なモデルとなる。写真を撮影した箇所の座標がGNSSから取得できる場合や写真上に座標が分かる既知点(GCP:

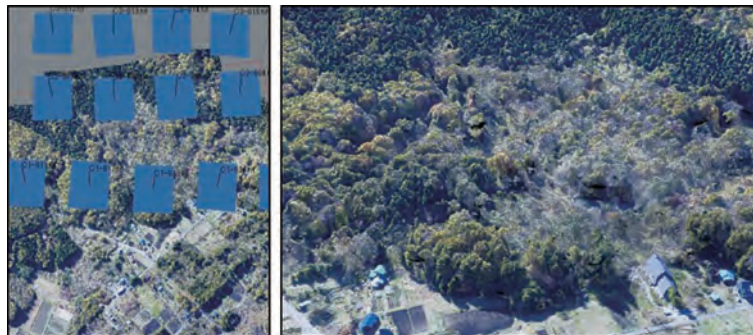


図-2 SfMソフトを用いた3次元モデル作成例

Ground Control Point)があれば、空中写真測量と同じように絶対値を持つ3次元モデルが作成できる。図-2に3次元モデルを作成した事例を示す。

SfMソフトでは写真間でマッチングした点の集合体(点群)も併せて作成される。これはレーザー計測で作成される樹冠表層標高(DCSM)と同じであり、地盤標高モデル(DEM)との差分により樹冠表層高(DCHM: Digital Canopy Height Model)を作成することができる。多くの場合は空中写真から精細なDEMを作成することが困難であり、国土地理院が提供する数値標高モデル(10mメッシュ)や既存のレーザー計測から取得されたDEMとの差分によりDCHMが作成されることがある。これにより、レーザー計測と同様に面的に点群情報を作成して林分の樹高を把握することが可能となり、レーザー計測で行う解析手法が一部適用できることから、林分、単木レベルの解析への展開が期待されている。しかし、SfMソフトの課題として、写真のマッチング精度の問題がある。影の部分やギャップなどは樹冠表層の再現性が落ちるため、樹高の計測精度が低くなる可能性がある⁵⁾。また、間伐の施業状況の把握などは困難であることが多い。一方で、裸地化している皆伐地はマッチング精度が高いことから、皆伐の施業状況の把握が容易に行えると考える。

過去の空中写真の活用も期待されているが、SfMソフトを活用する場合は以下の点に注意が必要である。

- ① SfMソフトは写真間のラップ率が低い場合、マッチングができないので、ラップ率80%を目安に写真を選定する。
- ② 白黒写真の場合マッチング精度が低くなるため、できるだけカラー写真を選定する。

SfMソフトの発展によりUAV(Unmanned Aerial

Vehicle:無人航空機)も含めた空中写真の活用に注目が集まっており、今後も空中写真の利用は進むと考えられる。樹高計測を含めた森林資源モニタリングでは、始めにレーザー計測で地盤面を正確に把握し、以後数年おきに空撮に空中写真を取得して、モニタリングを行うというモデルが今後検討されていくと考えられる。そのためにもSfMソフトによる写真間のマッチング精度に関する研究が今後重要になると考える。

3.2 航空レーザー計測データを用いた資源把握

航空レーザー計測については研究レベルから実務レベルでの活用段階に入っている。解析に用いるレーザー計測データは単木レベルの解析を行うことを想定し、4点/m²以上の密度で取得されることが一般的になっている。レーザー計測を用いた資源把握では、小班や林相を解析単位とした林分レベルの解析と毎木の資源を把握する単木レベルの解析の2種類に分けられる。

3.2.1 林分レベルの解析

林分レベルの解析は解析対象をマスとして考える手法で、小班単位の平均樹高、材積、林分垂直構造などが把握できる。航空レーザー計測の計測密度は1~4点/m²のデータが用いられることが多い。レーザー計測による樹高はDCSMとDEMとの差分から得られるDCHMから計算される。これまではレーザー計測会社が行う処理であったが、ArcGIS(ESRI社、米国)ではlas形式のレーザー計測データをそのまま利用でき、比較的簡単にユーザーがDCHMを計算できるようになってきた。材積については大きく2種類の計算方法がある。樹冠表面の情報のみのDCHMに関わる情報と現地調査で得た材積の情報との相関から回帰式を作成する手法^{6,7)}(図-3)と林内(樹冠内部)からのレーザー反射点も利用してパーセンタイルの樹高(データを小さい順に並べ、

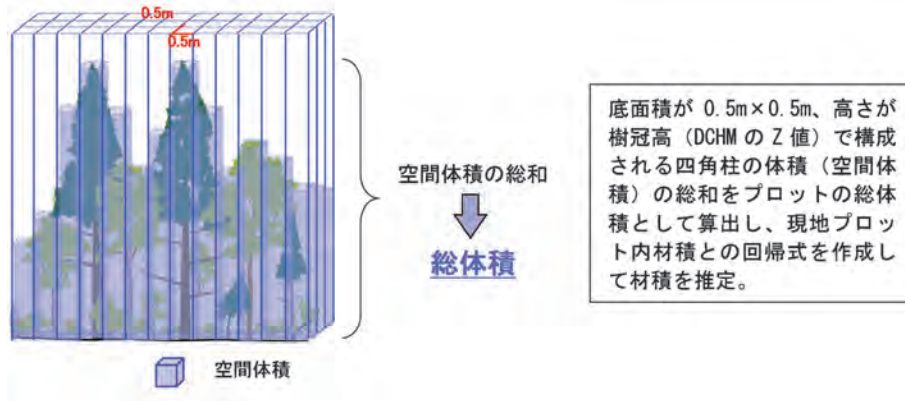


図-3 DCHM による材積推定の概念

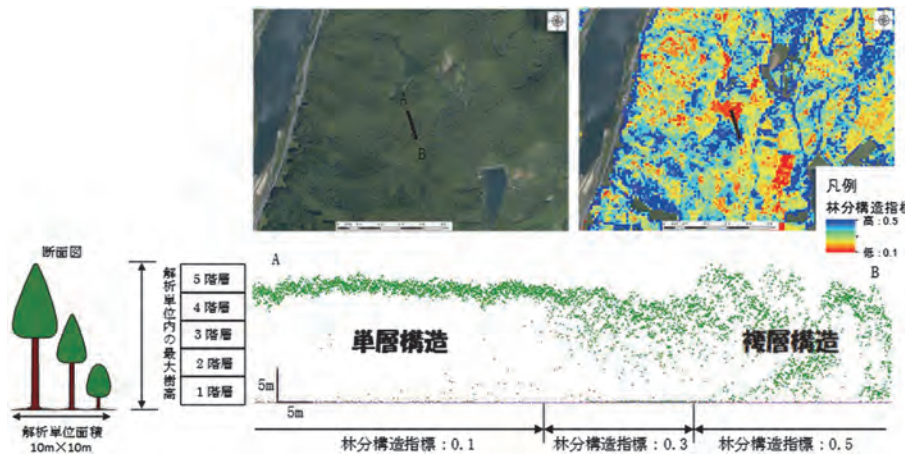


図-4 垂直構造の解析事例

小さい数値からのパーセンタイル値に位置する値) やレーザーパルスの透過率などを変数に重回帰分析をする手法^{8,9)}である。国内では前者の手法が一般的で、1～2割程度の誤差で材積の把握が可能である。しかしながら、説明変数が樹高の値のみであることから、地位の差や地域差が影響して単一の回帰式で材積を把握することは困難であり、樹種毎、地域毎に回帰式を検討する必要がある。

また、レーザーパルスの垂直分布を解析することで、林分の垂直構造や光環境を評価することができる。単層林では上層の樹冠部からのレーザーパルスのみの反射となるが、複層林では上層から下層まで万遍なく反射パルスが分布している。この違いを階層毎の反射パルスの割合で表し、垂直構造の評価を行った結果が図-4である³⁾。

3.2.2 単木レベルの解析

単木レベルの解析では1本1本の樹木を対象に解析

を行い、対象地全木の位置を抽出し、樹高、胸高直径、材積、樹冠長率、形状比などが把握できる。樹木の位置を抽出する手法として、LMF (Local Maximum Filter)、Watershed アルゴリズム、樹冠の形状などを用いる手法¹⁰⁻¹³⁾があり、解析はDCHMがベースとなっている。DCHMの精細さが樹木の抽出精度に影響を与えるため、単木レベルの解析ではレーザー計測密度の設定は非常に重要である。これまでの研究事例から1,600本/ha程度の林分を対象にすることを想定すると、レーザー計測の密度は4点/m²以上にする必要があることが分かっている¹⁴⁾。

胸高直径と樹冠の大きさには相関があることが報告されていることから、レーザー解析で得られる樹冠投影面積、樹冠表面積、樹冠体積と現地調査の胸高直径との関係から回帰式を作成し、胸高直径を推定することができる(図-5)。なお、回帰式はプロットの平均値を用いて作成するが、回帰式は単木の樹冠サイズに適用して、単

リモートセンシングでバイオマスを測る

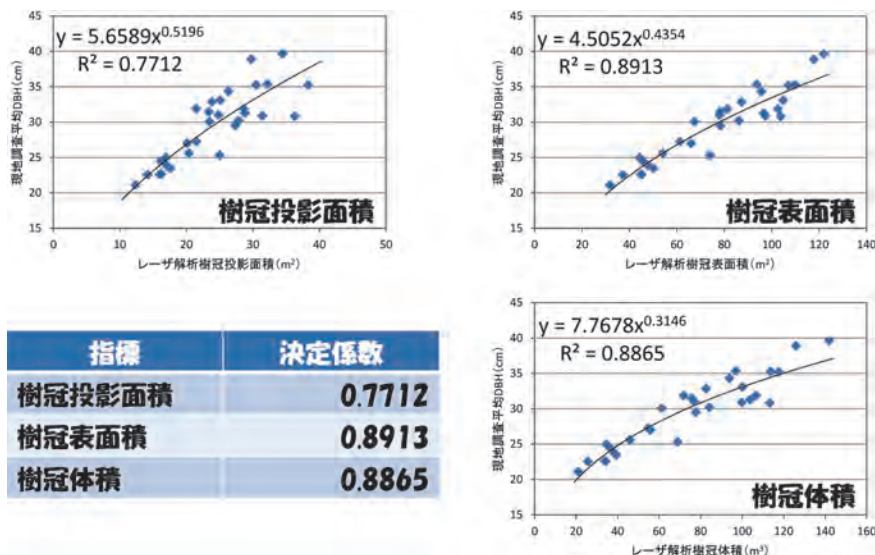


図-5 樹冠の大きさと平均胸高直径との関係

木の胸高直径を推定する。

樹冠の大きさを用いた胸高直径の推定精度は2cm程度であり、レーザー計測による樹冠の解析により高い精度で胸高直径を推定できることが分かってきた。

また、材積については材積式に樹高と胸高直径を適用して計算することができ、誤差としては1～2割程度で算出できることが報告されている^{10,15)}。

これらの毎木で算出された情報は小班などで集計され、立木密度、平均樹高、合計材積、平均樹冠長率、平均形状比、収量比数が得られる。これらの情報はGIS情報として整備され、レーザー計測で得られる等高線図や微地形表現地図などの地形情報と共にGIS上に表示することができる。そして、GISの解析機能により、地形情報と資源情報を組み合わせたゾーニングが可能となる。例えば、傾斜が緩く、路網に近く、資源量が多い箇所を林業振興ゾーンとして、一方で、傾斜が急で、保全対象に近く、収量比数が高い箇所を間伐施業優先箇所として選定することで、目的に応じたゾーニングができる。このように、整備したGIS情報により客観的な同一基準で優先度が把握でき、位置(対象箇所の分布)や面積も簡単に把握することができる。

単木レベルの解析により、これまでのサンプル調査が、対象地全域の毎木調査に変わるため、資源量をより正確に把握することが可能になると考えられる。さらに、現地調査の労力が軽減されるため、現地調査の代替手法と

して活用される場面は増えることが予想される。

4. まとめ

今後の発展的な航空機測量データを用いた資源把握に向け、現地調査方法の注意点や新たな解析方法について紹介した。航空機測量データを用いた資源把握結果を精度検証するための現地調査方法については、事前準備段階で航空機測量データとの比較を考慮した現地調査設計が必要になり、調査実施時にはプロット内の樹種構成や位置情報が重要になる。また、リモートセンシングを取り巻くハードやソフトの技術の進歩により、空中写真やレーザー計測といった航空機測量データを用いた資源把握は県レベルなど広域を対象にして機械的に処理できるようになってきた。さらに、資源把握は単木レベルで詳細に行うことが可能となり、現地調査の代替としても利用できるレベルになってきている。

ICT技術が進歩する社会の中で森林を取り巻く環境も自ずとその流れに乗り、森林リモートセンシングの研究や応用は加速度を増して進んでいくことが予想される。将来的には、航空機測量データを用いた定期的な効率的資源把握が日本林業の再生に寄与することが期待される。

引用文献

1) Zimble DA, Evans DL, Carlson GC, Parker RC,

- Grado SC, Gerard PD (2003) Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sens Environ* 87: 171-182.
- 2) 大野勝正・小川吉平・小山田順二・川内野あい子 (2010) LiDAR データの中間パルス等を用いた林分垂直構造把握手法の検討. 写測学会平成 22 年度年次学術講演会発表論文集、81-82.
- 3) 大野勝正・伊藤史彦・濱田 央 (2012) レーザー反射パルスの垂直分布を利用した森林の垂直構造の把握. 写測学会平成 24 年度秋季学術講演会発表論文集、33-34.
- 4) Riaño D, Meier E, Allgöwer B, Chuvieco E, Ustin SL (2003) Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sens Environ* 86: 177-186.
- 5) 伊藤史彦・大野勝正・小川吉平・飯島康夫・木村光一・平野均一郎 (2011) 森林調査を目的とした航空レーザー計測およびデジタル空中写真による DSM の比較. 第 33 回測量調査技術発表会技術発表・特別講演要旨集、10-11
- 6) 今井靖晃・舟橋 学・天野正博・岩本宏二郎 (2010) 航空レーザーの空間体積を用いた植林地の簡便な材積推定方法. *測量* 2010.1: 21-24.
- 7) 大野勝正・伊藤史彦・和智明日香 (2013) 航空レーザー計測データを用いた林分材積式の検討. 写測学会平成 25 年度秋季学術講演会発表論文集、61-62.
- 8) Næsset E (1997) Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J Photogram Remote Sens* 52: 49-56.
- 9) Ioki K, Imanishi J, Sasaki T, Morimoto Y, Kitada K (2010) Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return LiDAR: plot-based approach. *Landscape Ecol Eng* 6: 29-36.
- 10) Hyyppä J, Kelle O, Lehtikoinen M, Inkinen M (2001) A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners. *IEEE T Geosci Remote* 39: 969-975.
- 11) Ke Y, Quackenbush LJ (2008) Comparison of individual tree crown detection and delineation methods. *Proceedings of the 2008 ASPRS Annual Conference*.
- 12) 大野勝正・沼田洋一・平野 篤 (2007) LiDAR データを用いた単木抽出手法の高度化. 写測学会平成 19 年度秋季学術講演会発表論文集、147-150.
- 13) 大野勝正・沼田洋一・平野 篤 (2008) LiDAR データを用いたスギ密林・ヒノキ林の単木抽出. 写測学会平成 20 年度秋季学術講演会発表論文集、59-62.
- 14) 縄村達也・遠藤貴宏・安岡善文 (2007) スギ人工林における LiDAR を用いた樹木抽出の最適観測密度に関する考察. *生産研究 (東京大学生産技術研究所)* 59: 329-331.
- 15) 大野勝正・和智明日香・佐々木貢 (2014) カラマツ林における LiDAR データ化解析による樹冠面積を用いた胸高直径の推定. 第 125 回日本森林学会大会学術講演集、76.

空中写真を利用した材積推定

大萱 直花 (おおがや なおか、(一社)日本森林技術協会)

1. はじめに

森林分野のリモートセンシングの中でも空中写真利用の歴史は長く、第二次世界大戦以前から朝鮮、満州などを中心に大規模な空中写真撮影と森林調査が実施されており¹⁾、拡大造林期には都道府県、国有林でも職員が立体視判読を業務の中に取り入れていた。現在ではデジタル撮影が一般的となり、さらにドローンによる超高解像度空中写真も入手可能となっている。

しかしながら、デジタルオルソ、GIS が普及するとともに、空中写真は単なる GIS の背景画像となり、衛星画像やフリーのインターネット地図に取って代わられつつあるのは皮肉なことである。空中写真はオルソ画像のみならず、立体視による詳細な判読、表層高データ (DSM) や近赤外データの利用など様々な活用できる。これらの空中写真の活用を、専門の知識や高額ソフトウェアがなくても誰でも簡単に行えるようにしたい。このために開発した空中写真分析ソフトが「もりったい」である。

本稿では、「もりったい」を開発した林野庁補助事業「デジタル森林空間情報利用技術開発事業のうち現地調査及びデータ解析・プログラム開発事業」の成果²⁾を中心に、空中写真を利用した材積推定の手法を紹介する。最後に、今後期待される新たな空中写真撮影技術についても触れる。

2. 「高さ」に基づく材積推定

2.1 推定方法

「もりったい」には、PC モニタ上で立体視を行う機能と、広域を対象に自動分析を行う機能がある。立体視機能、自動分析機能ともに材積推定が可能であり、図-1 にイメージを示したとおり、3 つの材積推定手法がある。

① 立体視により 0.1 ha 標準地の本数、樹高を目視判読し、林分密度管理図³⁾ から材積を求める。

② オルソを使った広域の自動分析により林相区画を生成し (図-2)、区画内の本数、樹高を推定し、林分密

度管理図から材積を求める。

③ オルソを使った広域の自動分析により林相区画を生成し、区画内の平均樹高から回帰式により材積を求める。

いずれの手法も高さに基づいた材積推定となっている。

従来の現地調査による材積推定では、胸高直径を毎木計測し、樹高を一部の測定から樹高曲線により推定した上で、直径と樹高から材積式により単木材積を求めるという方法が基本である。リモートセンシングの技術でも胸高直径を推定し、材積式に当てはめるという考え方も可能であるが、「もりったい」では胸高直径の推定は行わない。最も正確かつ容易に計測できる要素に基づき材積を推定することが合理的であり、その要素が現地調査では胸高直径で、リモートセンシングでは高さである。

3 つの手法のうち、①、②は本数、樹高から林分密度管理図により材積を求めるという点が共通であり、本数、樹高の要素を①は立体視判読、②は広域の自動分析により求める点で違いがある。林分密度管理図は、植物の密度と成長の関係 (密度理論) や主要な樹種の保育形式の解析を基に、同齢・単純・単層林の間伐による密度管理を行うために作成されたものである。林分での密度効果の法則、自然枯死線、幹材積に関する 2 分の 3 乗則が一つの図に組み合わせられている。林分密度管理図の優れた点は、実際に林分で計測可能な、樹高、胸高直径、林分密度、材積の相互関係を理論的に結合させて、実務にも使えるように図化した点にある。

しかしながら、林分密度管理図が作成されたのは昭和 50 年代が中心であり、適正な間伐の実施を前提とした図になっている。このため、間伐遅れが多い現状の林分に当てはまるかが懸念された。そこで、林分密度管理図の精度検証を行った。

現地調査により材積式から求めた単木材積の積上げ (積上げ材積) と林分密度管理図から求めた材積 (密度管理図材積) を比較した。調査プロットの大きさは 0.1 ha、樹種はスギ、設定箇所は全国各地である。この

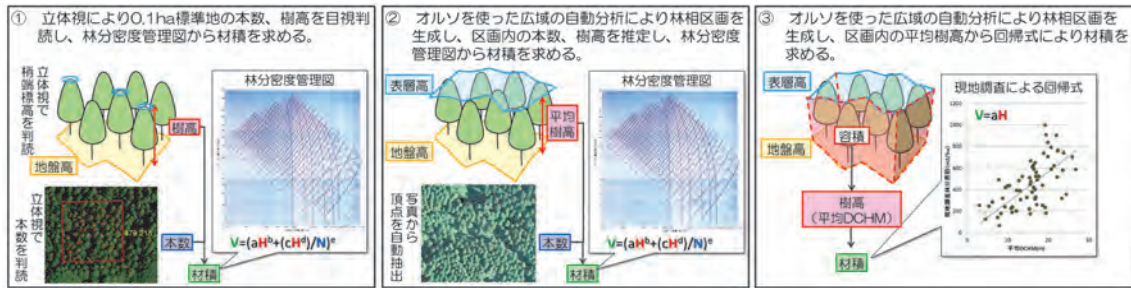


図-1 「もりったい」材積推定手法のイメージ

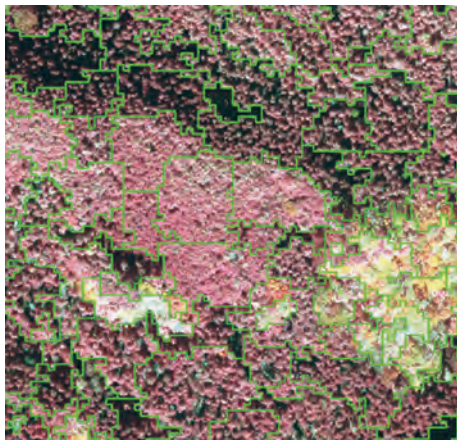


図-2 近赤外画像上に自動生成した林相区画線

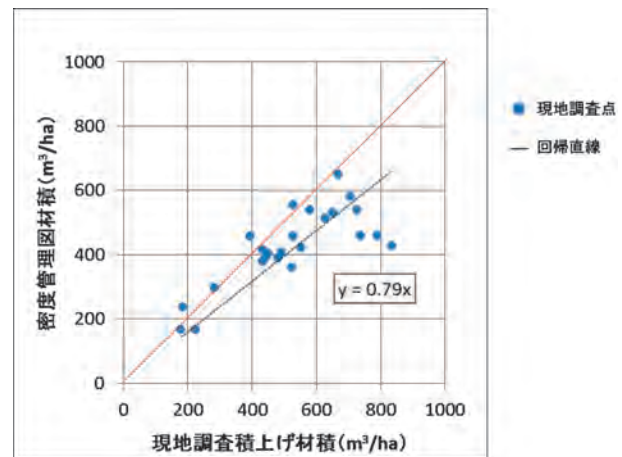


図-3 密度管理図材積の検証

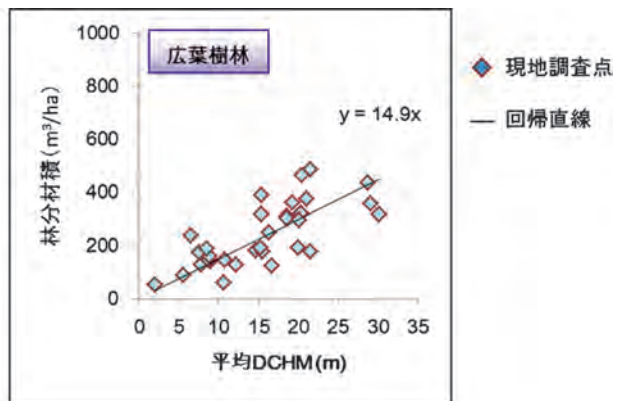
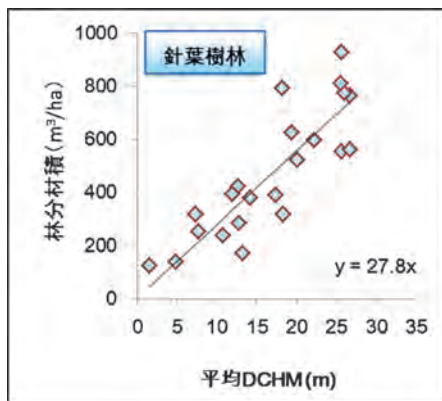


図-4 DCHMと材積の関係

うち、900m³/ha未滿の24プロットについては、図-3に示すように、密度管理図材積が過少傾向にはあるものの、利用可能な範囲にあると考えた。

一方、手法③は、表層高 (Digital Surface Model, DSM) と地盤高 (Digital Terrain Model, DTM) の差分により求めた平均樹冠高 (Digital Canopy Height Model, DCHM) と現地調査積上げ材積の関係式により材積を推定するものである。「もりったい」では、図

-4のとおり、全国に設定した針葉樹林22プロット、広葉樹林32プロットの結果を用い、空中写真から作成したDSMとレーザ計測から作成したDTMの差分によるDCHMから求めた回帰式を使っている。

2.2 推定精度

九州地方スギ人工林15プロットにおいて現地調査積上げ材積と手法①～③の推定材積、森林簿材積を比較した。それぞれの方法は表-1の通りである。

リモートセンシングでバイオマスを測る

表-1 比較した材積推定方法

方法	「もりったい」による ha 当たり材積の推定方法
現地調査積上げ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 樹高 10m 以上の立木を対象 ・ 直径・樹高から単木材積を推定 ・ 単木材積の総計より算出
①立体視 / 林分密度管理図	<ul style="list-style-type: none"> ・ 単木の樹高を 10 本判読し、平均樹高を算出 (地盤高はレーザ) ・ 梢端を目視で判読し本数密度を算出 ・ 平均樹高、本数密度から密度管理図により求める
②広域自動分析 / 林分密度管理図	<ul style="list-style-type: none"> ・ 写真表層高とレーザ地盤高から平均樹高を自動算出 ・ 写真から本数密度を自動算出 ・ 平均樹高、本数密度から密度管理図により求める
③広域自動分析 / 回帰式	<ul style="list-style-type: none"> ・ 写真表層高とレーザ地盤高から平均樹高を自動算出 ・ 現地調査結果との関係式により求める
森林簿	<ul style="list-style-type: none"> ・ プロットを含む地番 (枝番) 内の樹種がスギである林分の総材積から算出

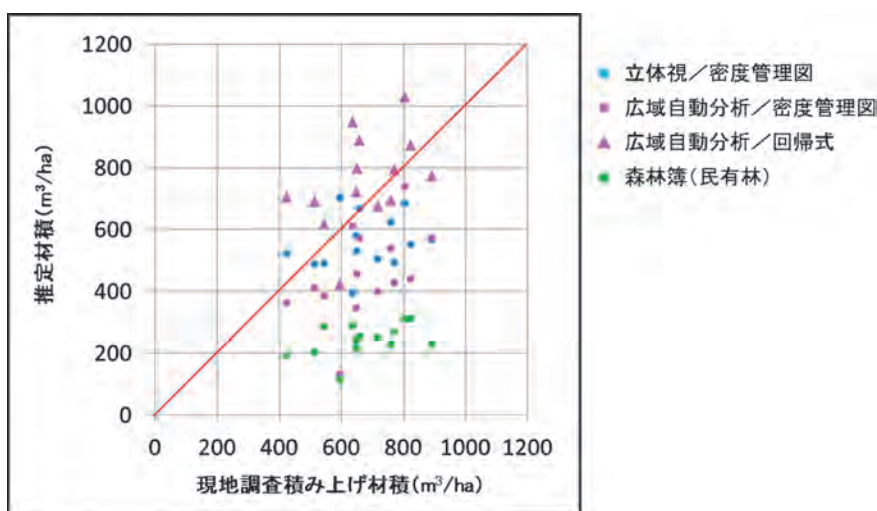


図-5 材積推定手法別の現地調査材積との比較

本数密度の誤差率(=絶対値(推定値-現地調査)÷現地調査)は、立体視で平均 16.6%、自動分析で平均 30.8%、樹高の誤差率は、立体視で平均 11.9%、自動分析で 10.9%である。樹高に比べて本数密度の誤差が大きい。

材積の比較結果は図-5の通りである。①立体視 / 林分密度管理図と③広域自動分析 / 回帰式は平均誤差率が 20%程度であり、比較的精度が高かった。誤差が大きい、自動分析の本数密度を用いない方法で精度が高いといえる。森林簿の誤差率が極端に大きいため、20%の誤差率でも十分実用的であるといえる。

また、③広域自動分析 / 回帰式は、地域ごとに現地調

査を行って回帰式を作成することで精度向上が期待できる。

3. 活用に向けて

以上の通り、空中写真を利用することで広域の資源量を効率的に把握することが可能となる。現在、「もりったい」を用いて、都道府県の森林簿修正、バイオマス発電に資する資源量把握が試みられている。

空中写真を利用した材積推定において重要なのは、樹高の精度を確保すること、すなわち精度の高い地盤高(DTM)を入手することである。前節の精度検証でも、表層高(DSM)は空中写真から作成したが、DTMはレー

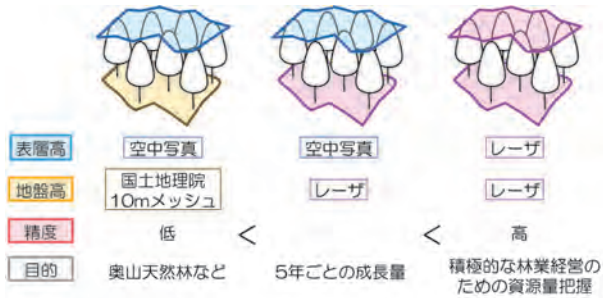


図-6 樹高を求めるためのデータの組合せと目的

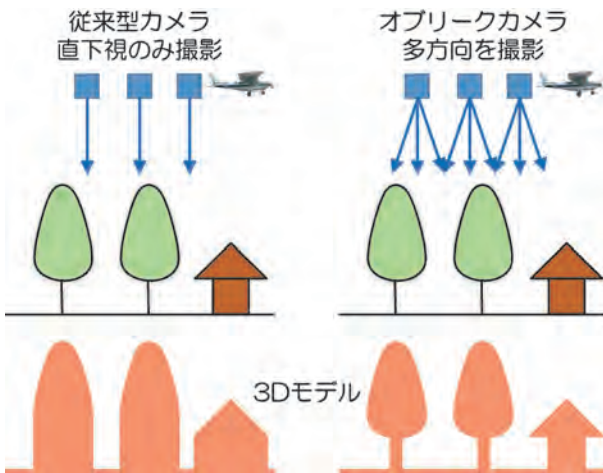


図-7 オブリークカメラによる 3D モデルのイメージ

ザ計測から作成したものを使用している。全国で利用可能な DTM としては国土地理院の基盤地図情報 10m メッシュ (標高) があるが、森林域では微地形が反映されておらず、材積の推定精度は実利用可能なレベルとは言い難い。基盤地図情報の 5m メッシュ (標高) は、レーザー計測データから作成されたものが多く、実利用可能な精度が得られる。整備範囲も全国に広がりつつある (地理院地図ホームページ>情報>表示できる情報>地図空中写真>基盤地図情報>基盤地図情報の提供地域> 5m メッシュ DEM (航空レーザー測量) にて整備範囲を閲覧可能)。

5m メッシュ (標高) の未整備地域では、航空レーザー計測による DTM データ整備が望まれる。ただし、航空レーザー計測は空中写真撮影と比較すると取得費用が桁多くなるため、森林域を定期的に計測することは難しいと考えられる。DTM を取得するために 1 回はレーザー計測を行い、以降は空中写真撮影による DSM を定期的に取得し、森林現況を把握することが現実的なデータの組み合わせである。大災害による地形変化が発生しない限



写真-1 ドローン

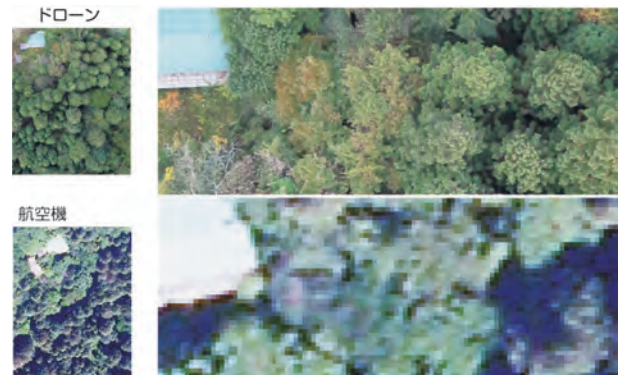


図-8 ドローン撮影画像と航空機撮影画像の比較

り、DTM を更新する必要はない。図-6 に示すように、精度 (=データ取得費用) と目的のバランスを考えてリモートセンシングデータを利用する必要がある。

4. 新たな空中写真撮影技術

新たな空中写真撮影技術として、オブリークカメラ、ドローンによる撮影について簡単に紹介する。

オブリークカメラは、多方向を向いた複数レンズを持つ。従来の直下視の撮影から作成する 3D モデル (DSM) は物体の表層高のみを表すが、オブリークカメラは図-7 のように斜め方向から物体の側面をも撮影することにより、実体に近い詳細な 3D モデルを作成することができる。この 3D モデルから材積推定を行う可能性が考えられる。

ドローン (写真-1) による撮影は、数万円から 2 百万円という比較的安価な機体に、市販のデジタルカメラを搭載し空中写真を撮影するものである。撮影高度は 100 ~ 200 m 程度、地上分解能は数 cm 程度であるため、取得できる画像データは超高解像度と言えよう。この解

像度を活かすためには、自動分類より立体視が適していると考えられ、「もりったい」による立体視も実現できる。ドローンの機動性を活かした利用を考えると、データ処理の低コスト化、スピード化が必要である。

5. 終わりに

空中写真の解析は古くて新しい技術である。PC モニタでの立体視も、実体視鏡での立体視も、原理は変わらない。詳細な 3D モデル作成も、2 枚の写真による立体視が複数写真に拡張しただけで原理は同じであるという。コストと成果を考えたときに、バランスの取れた手法であることが、息の長い技術の発展につながるのではないだろうか。

引用文献

- 1) 大貫仁人 (2000) <森林航測>の変遷. 林業技術 No.705 : 25-30.
- 2) 株式会社パスコ・一般社団法人日本森林技術協会 (2013) 平成 24 年度デジタル森林空間情報利用技術開発事業のうち現地調査及びデータ解析・プログラム開発事業報告書. 161pp. (日本森林技術協会ホームページ>販売品・出版物>森林立体視ソフト「もりったい」よりダウンロード可能)
- 3) 社団法人日本林業技術協会 (1999) 人工林林分密度管理図, 22pp.

地上レーザーを用いた正確な バイオマス測定

加藤 顕 (かとう あきら、千葉大学 園芸学研究科)

はじめに

森林にまつわる国内外の環境政策において、森林による炭素蓄積機能が注目されるようになった。その炭素蓄積量に応じてクレジットを発行し、市場で取引できるようになってきている。そのためには、森林を正確にモニタリングする必要があり、正確に測定する技術が求められている。炭素蓄積効果を数字として把握するために、様々な手法が試みられている¹⁾。炭素蓄積量を算出するためには、森林のバイオマス（重さ）を測る必要があり、バイオマスを把握するためには、樹高、胸高直径を計測しなければならない。樹高や胸高直径を測定できれば、予め決められた材積式²⁾に代入することで幹の体積（材積）が計算でき、密度を掛け合わせれば、バイオマスを計算できる。さらに0.5を掛け合わせることで森林が蓄積している炭素量まで算出できる。このため、バイオマスを測定する算出根拠は幹の体積であり、幹の体積を正確に測定する方法が望まれている。

人の手で測ってきた森林計測を広域の森林で行う場合、衛星リモートセンシングデータや空中写真を活用する。衛星からの画像データから土地利用図を作成し、その地図を基に現地で調査地（調査プロット）を設定し、調査が行われる。森林計画図や森林簿が整備されている場所では、それらのデータを用いて調査を行う。

自ら調査するデータ以外にも、林野庁が全国で広範囲を調査したデータである森林生態系多様性基礎調査データが利用可能である。このデータは、全国を4kmメッシュに分けて、各格子点が森林である場所を調査したデータであり、有効活用することでより正確なバイオマスを広域で推定することができる。衛星データを併用することで、人が測定できない場所での炭素蓄積量を把握することもできる。しかし、広域のデータを用いて推定した蓄積量を、詳細に測定した森林調査データと比較しても異なる場合が多い。その理由としてそれぞれの蓄積

推定時に、異なる式（モデル）を用いてバイオマスを推定していることが挙げられる。モデルが異なれば、結果も大きく異なるため、最適なモデルを選定しなければならない。また、モデルを作成するために使用したデータを取得した場所周辺では誤差が少ないが、その場所から離れれば誤差が大きくなることもある。さらに、人によって計測されたデータを用いて広域での推定を行うため、測定ミスによる計測誤差が含まれていた場合は、広域での推定ではその誤差が増幅される。そのため、広域での解析（国や県ほどの広範囲な地域）と地域での解析（業務に必要な林班単位）では、バイオマスの測定結果が異なる。広域で推定したデータは地域間を比較する際の重要な基礎資料となるが、正確性のあるデータとして森林現場で使用することは難しい。東南アジアの発展途上国における熱帯林のモニタリングや先進国での森林簿整備のための広域モニタリングでも同じ問題を抱えている。

広範囲でのバイオマス測定の精度を向上するために、広範囲の3次元データが取得できる航空機レーザーデータが用いられるようになってきた。航空機レーザーデータの取得は、日本でも国土地理院が地形図を作成するために全国でデータ整備を進めている。すでに取得された航空機レーザーデータを森林域に用いる研究も行われているが、地形図を作成するためにデータを取得しているため点密度が低く、森林を正確に計測できるほどのデータの質がない。新たに高密度で航空機レーザーデータを取得するには多大な費用がかかるため、容易に3次元データを取得できない。また、上空から樹高計測ができて、胸高直径のように幹部を計測することは難しいため、樹冠状況からの材積を推定することになる。

広域でのバイオマス測定精度の改善や現場で必要とされている正確な森林計測に応える新たな技術として、地上で計測する地上レーザーによる3次元データの活用をご紹介します。

リモートセンシングでバイオマスを測る

表-1 市販されている代表的なレーザーセンサー一覧（センサー価格の昇順で表示）

メーカー	型番	最長距離 (m)	レーザー波長 (nm)	ビーム幅 (mrad)	重さ (kg)
Hokuyo	UTM 30LX-EW	30	905	3.00	0.2
SICK	LMS511	40	905	4.70	3.7
SICK	LD-LRS	120	905	4.70	4.1
FARO	Focus 3D S	153	905	0.19	5.0
Leica	Scan Station C5	300	532	0.20	14.0
Leica	Scan Station C10	300	532	0.20	13.0
Leica	Scan Station C20	120	808 / 658	0.20	14.0
TOPCON	GLS-1500	550	1535	0.16	16.0
TOPCON	GLS-2000	350	1064	0.31	10.0
RIEGL	VZ-400	600	1550	0.35	9.6
RIEGL	VZ-1000	1400	1550	0.30	9.8
RIEGL	VZ-4000	4000	1550	0.14	14.5

注) メーカーホームページに掲載してあるカタログから作成

センサー名	RIEGL VZ400	SICK LMS511
レーザー波長	1550 nm (近赤外域)	905 nm (赤外域)
最大照射距離	600 m	40 m
計測レンジ	水平 360°x 垂直 100°	水平 360°x 垂直 150°
		

図-1 代表的な地上レーザーセンサー
可搬性に優れ、どこでも持ち運びができるため、地上設置していつでも、どこでも3次元計測ができる。左側センサーは富士設計株式会社が所有するセンサー、右側の3次元スキャナーはSICKのセンサーに回転台を付け、千葉大学環境リモートセンシング研究センターの梶原先生と本多先生によって安価な3Dスキャナーとして製作したもの

地上レーザーによる3次元データ

地上レーザーとは、可搬性が優れているレーザーセンサーを調査場所に設置し、どこでも3次元データを計測できるようにしたものである(図-1)。地上レーザーによって森林内部の構造物をすべて3次元データとして計測できるため、樹木幹部の測定精度を向上させるこ

とができる。さらに、人の手では計測が難しかった樹木上部の構造も詳細に3次元データとして計測できる。航空機レーザーに比べ、安価でいつでもデータが取得できるため、高頻度で計測ができることも優れている特徴である。地上レーザーを用いれば人の計測よりも誤差が少なく森林の計測ができるため、森林のモニタリング期間を短縮できる。さらに、3次元データとしてアーカイブし、過去のデータに戻って再計測ができるため、経年変化をより明確に比較できるなど、高頻度で計測できる地上レーザーによるデータ取得は利点が多い。

地上レーザーセンサーにも様々な機種があり、最近では簡易型で安価なレーザーセンサーが普及し始めている(表-1)。値段の差は、レーザーが到達できる距離である。高額なセンサーを用いれば、地上でセンサーを設置する箇所を少なく、広範囲のデータを取得することが可能であるため、データ取得効率が良い。高額なセンサーを用いる場合は、データ取得のために、センサーを所有する業者へ外注することもできる。安価なセンサーを用いる場合は、レーザーセンサーのセットを一式購入し、自らデータを取得する。

地上レーザーによる解析

地上レーザーによる3次元データから樹木を正確に計測するためには、地形図を正確に作成する必要がある。そのため、地上レーザーからでも正確な地形図デジタルデータ(Digital Terrain Model, DTM)を作成できるよ

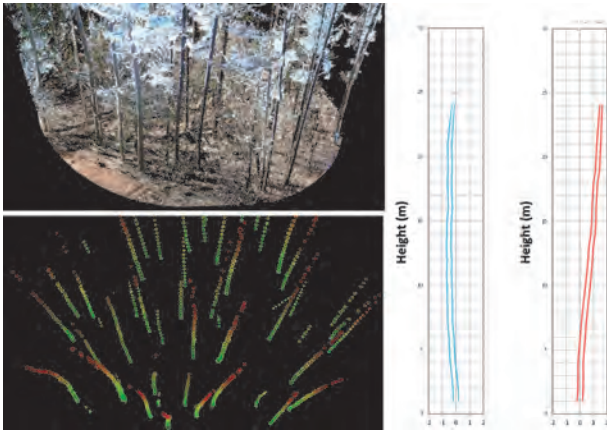


図-2 樹木を様々な高さで抽出して計測した様子(左図)と曲がりをも単木単位で表示した結果(右図)

うにした。Digital Surface Model (DSM)を作成し、DSMとDTMの差分からDigital Canopy Model (DCM)とよばれる樹冠高を表すデジタルデータを作成する。デジタルデータから樹頂点であるピークを自動で判別し、そのピークを梢端と定義し、自動で樹高計測を行うことも可能である。しかし、梢端の位置が幹元の位置と必ずしも一致しないため、正確な樹木位置図を作成するために、幹の位置を把握する必要がある。地上レーザーは他のデータと異なり、林内でセンサーを設置しているため、正確な幹の位置図を作成でき、その正確な幹元の位置から、単木単位でのデータを自動で切り出し、様々な高さでの幹直径を3次元データから計測できる(図-2)。また、胸高直径や樹高に関して、現場作業員が計測した値と相関関係が高く、胸高直径では誤差が2cm以内、樹高では50cm以内で計測が可能である。これら地上レーザーによる計測精度は、熟練した現地作業員が測定した結果とほぼ同じである。しかし、用いるレーザーセンサーや解析手法によって計測誤差が変わるため、よりRIEGL VZ400といった精度の良い地上レーザーセンサーの使用や以下にご紹介する正確性の高い解析方法を用いる必要がある。

応用事例1. 単木単位での材積測定

地上レーザーにより、高精度で詳細な幹形状の3次元データが取得できても、最適な解析手法を用いなければ、逆に計測結果が悪くなることもある。また、材積は材積表に記載されている樹種以外に様々な樹種で必要と

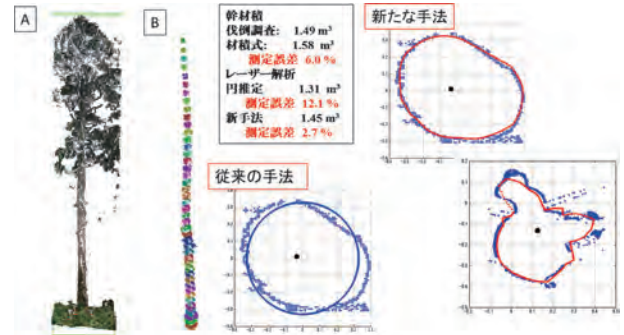


図-3 レーザーの解析手法

左下が従来の「円」による推定、右上が新たな手法。円による推定では、材積式よりも誤差が大きくなる。新たな手法では伐倒した結果とほぼ一致し、従来のどの手法よりも正確に材積を把握できる。適切な解析手法を選ぶ必要がある。

されているため、より汎用性の高い測定手法が必要とされている。商用樹であるスギは、全国的に地域を反映した材積式が十分に整備されているが、場所によっては病害で幹形状が変化し、従来の材積式だけでは正確に推定できないことがある。これらの課題を受け、汎用性が高く、かつ複雑な幹断面でも正確に計測できる手法を開発した。さらに、この手法は熱帯林のように樹形が複雑な種に対しても有効な手法である。

幹直径は、幹の周長から計算できるが、従来の幹周長の計測手法は、円を当てはめるしかなかった。そこで、複雑な断面形状に当てはまりが良い、より正確に周長を計測できるアルゴリズムを開発し、幹周長から幹直径を正確に測定できるようにした。さらに各高さで得られた幹直径の積算から、区分求積法により単木全体の材積を正確に把握することもできる。伐倒したサンプルと比較した結果、レーザーデータを用いると、これまでのどの手法よりも正確に材積を解析できた(図-3)。この結果より、樹木を伐倒せずに3次元データから幹材積を正確に計測できることがわかった。この手法を用いれば、伐倒ができない樹木(保存樹)に対しても3次元データが有効活用されると考えられる。

応用事例2. 広域へのスケールアップ

広範囲をデータ取得したい場合、地上レーザーだけでは1回の設置場所からデータ取得できる範囲に限界がある。また、地上レーザーを用いる際の技術的問題として、センサー設置場所の代表性と位置座標付けがある。

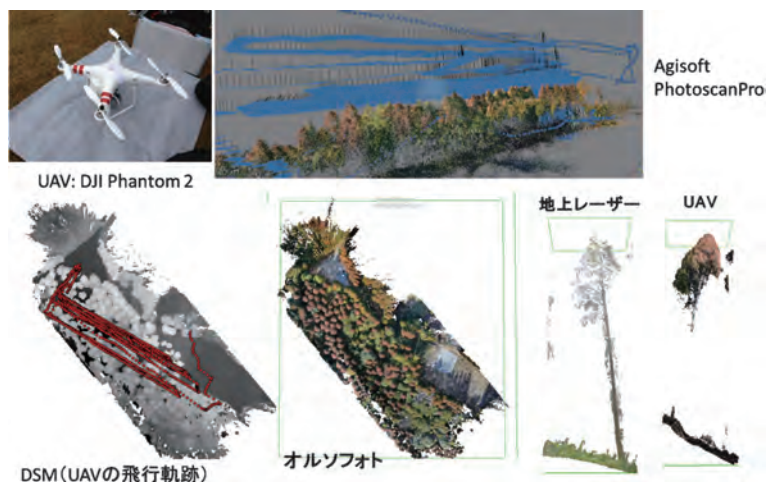


図-4 無人飛行機（UAV）により取得した写真画像だけから3次元化したデータを地上レーザーデータとデータ融合し、単木単位でデータ比較できるようにした（図右下）。その結果、樹冠部はUAVによって詳細に取得できているところもあったが、幹部は地上レーザーによるデータ取得が確実であった。

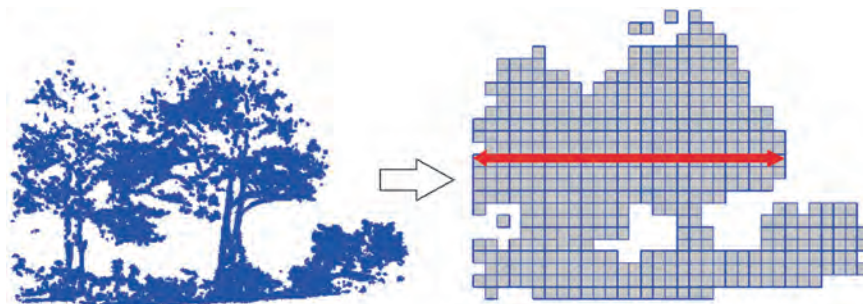


図-5 ボクセル法による3次元データより樹冠連続性を評価する手法(左図:レーザーからの3次元点群、右図:樹冠連続性としてボクセル数が最大となる高さ)

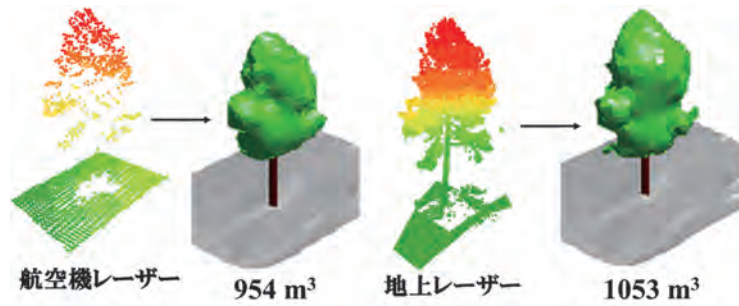
そこで、地上レーザーの取得範囲の限界を把握し、3次元データをスケールアップするために、無人飛行機（UAV）によって上空から取得した3次元データと地上レーザーのデータを融合できるようにした。

GPSを付けたUAVによる空撮で、連続的に写真撮影し、そのステレオ写真だけを用いて写真測量技術（SfM：Structure from Motion）から3次元データを作成した。UAVを用いて作成された3次元データと地上レーザーによって取得した3次元データをデータ融合することで、地上レーザーを取得した位置座標のズレを補正できる。地上レーザーによって林内でデータを取得する際、高精度GPSを用いても0.5～5mほどの位置ズレが生じてしまうが、コンピュータ上で3次元データの位置の補正ができるため、UAVと地上レーザーデー

タがあれば、どこでも位置座標が付いた3次元データを提供できる（図-4）。また、地上レーザーによって測定した正確性の高い結果をUAVからの3次元データを用いてスケールアップすることも可能である。

応用事例3. 森林域における野生動物の生息域把握

胸高直径や樹高だけでなく、人の手が届かない場所の樹木部位も地上レーザーによって計測できるようになってきた。ボクセル法を用いることで樹冠が占める空間を算出し、その空間が占める樹冠体積³⁾から樹上性動物の生息域を把握する指標として用いることができる（図-5）。さらに詳細な樹冠形状はコンピュータグラフィックの手法を応用したラッピング法⁴⁾によっても把握できる（図-6）。既存の研究でわかっている野生動物の生



現地調査による樹冠体積 994 m³

Wrapping method - Kato *et al.*, (2009)
Remote Sensing of Environment 113 :
1148-1162
特許第5522367号(登録日2014年4月
18日)

図-6 コンピュータグラフィックの手法を用いてラッピングしたように樹冠形状を詳細に把握した結果(図中の数字は、単木の樹冠が占める体積を示す)

息域の条件を、森林構造の3次元データと比較し、樹上性動物の生息数を予測できるモデル式の開発を進めている。地上レーザーのような新たな測定技術が生態学の分野で広く利用されれば、現地調査において人の手で計測できる範囲よりも広範囲で調査ができるため、測定できる調査項目を増やすことができる。野生動植物の調査に3次元データが有効活用できると考えられる。

おわりに

地上レーザーによる3次元データは、森林測定という分野を通して、森林の機能を定量化できると考えており、私の研究では、あらゆる場所での3次元データの取得と解析を目指した手法の開発を行っている。森林域における生態系サービスの定量化は、炭素固定、生物多様性、防災などの幅広い分野で必要とされている。地上レーザーを用いた森林の詳細な構造把握は、森林計画の分野だけでなく、森林生態の分野でも重要な情報となり、これまで計測できなかった場所での詳細な測定により新たな発見を導き出したいと考えている⁵⁾。

従来の航空機レーザーと比較すると、地上レーザーの方がより詳細に森林内部の状況を把握できるため、森林の面的変化をモニタリングしていた「緑の量」から、森林内の状況(森林の階層構造の変化)を把握する「緑の質」へ3次元データを有効活用できると考えている。地上レーザーデータを森林政策に有効活用できれば、生物多様性を保つ林内構造を維持しつつ、将来の森林計画を立てていくこともできる。森林分野での従来の現地調

査手法において、地上レーザーが標準的調査手法として普及することを望むとともに、手が届かず計測できなかった場所を地上レーザーによって計測し、わからなかった森林の機能や植物の構造的役割を定量化できればと考えている。

引用文献

- 1) 平田泰雅・鷹尾 元・佐藤 保・鳥山淳平編(2012) REDD-plus Cookbook. (独) 森林総合研究所 REDD 研究開発センター、152pp.
- 2) 林野庁計画課監修(1970)「立木幹材積表(東日本編・西日本編)」
- 3) 加藤 顕・安藤祐樹・吉田俊也・梶原康司・本多嘉明・小林達明(2014) 簡易型地上レーザーを用いた毎木調査法. 日本緑化工学会誌 40: 136-141.
- 4) Kato, A., Moskal, L.M., Schiess, P., Swanson, M.E., Calhoun, D., Stuetzle, W. (2009) Capturing Tree Crown Formation through Implicit Surface Reconstruction using AirborneLidar Data. Remote Sensing of Environment, 113:1148-1162.
- 5) 加藤顕・石井弘明・榎木 勉・大澤 晃・小林達明・梅木 清・佐々木剛・松英恵吾(2014) レーザリモートセンシングの森林生態学への応用. 日本森林学会誌 96: 168-181.

街路樹を考える

二階堂 太郎

(にかいどう たろう、国立科学博物館 筑波実験植物園)



私が住むつくば市には、主要道路の総延長約50kmに渡って街路樹が植栽されていて、そのほとんどが直径30cm以上、高さ10～15mと大きい樹々に育っています。緑の壁が延々と続くこの規模は全国でも稀ではないでしょうか。ちなみに我が家から勤務先の植物園までを紹介すると、モミジバフウが5km、続いてイチヨウが2km、最後の直線はトウカエデが4kmと落葉樹3種が並んでいます。緑が濃厚な夏にはボリュームある枝葉が街の建物を遮り、ふとした瞬間にここは森の中かと錯覚することもしばしばです。私が特に好きなのは秋の紅葉で、街全体で織り成されるダイナミックな色彩の変化に目を奪われます。さりとて、問題点がないわけではありません。冬になると樹種や植栽場所によっては枝を極端に短く切断された異様な樹形が現れます。これまでの見事な緑や紅葉とのギャップに、落葉後には気落ちします。その後は葉が再び展開するまで約4ヶ月間、冷たく乾いた青空を背景に毎日それを見続けるのです。

樹木の剪定でやってはいけないとされる一つが、次世代を担う枝がない箇所での「ブツ切り」です。見た目が自然樹形からほど遠い上に、時にはその個体を死に至らしめます。街路樹がそのような姿に仕立てられてしまう原因はただ一つ。与えられた空間が狭いからです。上方で旺盛に伸びる幹や枝は車道の標識や信号を隠し、近くに電線が通っていると切断や感電の危険さえ生じます。毎年の剪定ならば樹形を大きく損なわないようにできますが、数年分の剪定を一回で行おうとすると極端な強剪定をする他はありません。また、当初の想像を超えて大きく育ってしまっていたらなおさらでしょう。結果、切断面が痛々しい人工物のような樹形が出来上がるのです。

私は、樹種によっては成長を抑えられないことを前提とし、時期がきたら小さい個体に植え替えるべきと考えます。長寿になるにしたがって増す腐朽による倒伏の危険を軽減させることも出来るでしょう。ですが、植栽マスの幅が1m程度しかないのに根元株径が30cm以上ある場合、歩道と車道を壊さなければ根株の撤去は不可能です。植栽帯の延長が長ければ、根株はそのまま残し

て他の空いている場所に新しく植えることができますが、そうでなければ道路の改修でもない限り植え替えは実現されません。そのような場所の樹については、そのまま残すか、いつ補植されるかわからない状況でも撤去するかしかなのです。はたして、大きく育って樹形を美しく維持できなくなった樹は、伐採しても視界から失くしてしまう方がよいのでしょうか。

大木になるプラタナスは街路樹によく利用されますが、なぜか高く伸びられない場所の狭い植栽マスに植えられます。そこではだいたい高さ3m位のところで切断され、大量の萌芽と剪定を繰り返し、巨大なこぶを幾重にも重ねた異様な姿になっています。私も造園会社にいた頃にそのような仕立て仕事をしましたが、いっそのこと伐採したほうが景観上よいのではないかと思ったりもしました。しかしその後、生命豊かな緑が展開されている景観を見て気付いたことがあります。たとえ見苦しい樹形であったとしても、そこで育たなければその緑はないのです。冒頭に述べたブツ切りの街路樹も同様です。長い年月をかけたその直径と樹高であるからこそ、その壮大な景観が作られているのです。たとえ植え替えが可能だとしても、今のボリュームある枝葉をつけるまでは30年以上も待たなければなりません。もし現状の緑を欲するのなら、「樹形が今のような形であっても仕方がない。」としなければならないのです。

夏になって樹々の列に緑が戻ると、つくば市の街路樹はやっぱりすごいなと心底思います。その頃には頭の中にあつたモヤモヤはすっかりなくなり、それどころか、この先20年後にはどんな景観になるのだろうとワクワクしたりもします。それはきっと私だけではないでしょう。つくば市の街路樹に接する多くの人々は、いろいろな理由の結果出来上がった樹形について否定したり、肯定したり... と忙しいのではないのでしょうか。

.....
著者プロフィール

二階堂太郎：1970年生まれ。山形大学農学部林学科修士課程修了。新潟市のらう造景(旧後藤造園)に入社、後藤雄行氏に師事する。現在は筑波実験植物園の技能補佐員。屋外エリアの管理と教育普及に携わる。樹木医、森林インストラクター。

林業遺産紀行 第2回



猪名川上流域の里山(台場クヌギ)について

服部 保 (はっとり たもつ、兵庫県立大学名誉教授)

林 義浩・遠矢 良宣・信田 修次

(はやし よしひろ・とおや よしのぶ・しのだ しゅうじ、能勢電鉄株式会社)



はじめに

古文書によると猪名川流域では、少なくとも平安時代より現在まで炭焼きが行われており、室町時代には千利休、豊臣秀吉が当地域の炭を茶の湯に利用したとされている。江戸時代に入ると、29の古書籍や古文書(表-1)に当地域の炭である一庫炭、池田炭の品質の高さ、クヌギを原木としたこと、10年の輪伐によって生産されたことなどが記述されている。このような良質の炭の原木となるクヌギの栽培法が台木仕立て(頭木、台場クヌギ)であることも当地域の里山の特色であり、林業遺産に選定された要因の一つである。

猪名川上流域の位置

猪名川は兵庫県東南部と大阪府北西部のほぼ府県境に位置しており、猪名川上流域には兵庫県川西市・猪名川町、大阪府箕面市・能勢町・豊能町が含まれ、これらの地域でクヌギを原木として生産された炭が一庫炭、池田炭とよばれている。

炭の特色

江戸時代の古書籍では、炭の火力、純度、形、香り、断面の菊割れなどの点から一庫炭・池田炭は最高級の炭とされ、炭の品質の高さから現在も茶道の道具炭として使用されている。

炭を生産する里山、クヌギ林の状況

茶道の道具炭を生産することによって、猪名川上流域の一部ではあるが、兵庫県川西市黒川のクヌギ優占の里山は現在も平安時代以来の里山景観(輪伐によるパッチワーク景観)を維持している。当地域はほぼ10年周期で伐採を繰り返すので、伐採直後から伐採直前までの林齢の異なった10林分がパッチワーク状、モザイク状に配置されている。

最初はクヌギの植栽によるクヌギ林が作られる。植栽後10~20年後、幹を地上から1~2mの高さで伐って、高い切株を作成する。その切株の上部から萌芽する幹を10年ごとに伐採を繰り返すと、切株は太くなり、直径

表-1 江戸時代の主な古書籍に記された池田炭・一庫炭に関する記述概要

古書籍名	著者	年代	記述概要
毛吹草	松江重頼	1645	名産である一庫炭は池田で販売され池田炭とよばれる
本朝食鑑	人見必大	1695	炭材としてクヌギ、池田、一庫炭が第1、第2は久留里炭
摂陽群談	岡田溪志	1701	一庫炭はクヌギ、香り良、火力は大、茶道に使用
和漢三才図会	寺島良安	1715	一庫、止久呂美(箕面市)で生産、切炭は菊の花状、久留里炭は池田炭に次ぐ
佐倉風土記	不明	1722	佐倉に切炭あり、茶道に使用、池田炭に似るがおちる
伊奈郷農事録	陶山鈍	1726	池田炭は山を10に分け、毎年1区画より生産(輪伐)
日本山海名物図会	平瀬撤斎	1754	池田炭は名物、クヌギを使用し、一庫で生産、最高級
撰津名所図会	秋里籬島	1798	クヌギを使用、一庫で生産、炭の断面は菊花状、茶道
閑田文章	今津屋辰三郎	1803	茶道に池田炭、香り
広益国産考	大蔵永常	1844	クヌギはひとかかえ以上(台場クヌギ)、茶道に使用



図-1 台場クヌギおよび台場クヌギ林

70～80cmに達するような株が形成される。このような株立ちのクヌギを台場クヌギと当地域ではよんでいる。台場クヌギは樹齢200年に達する個体もあり、また1844年に出版された広益国産考に記述されていることから400年近い歴史を持つと考えられる。

台木仕立てのクヌギ林は京都府、滋賀県、山梨県などにも見られるが、これらの地域では古文書、古書籍の記録がないだけでなく、現在は放置されており、利用方法も不明である。当地域では現在も台場クヌギが利用されており、かつての里山景観を見ることができる数少ない場所である。

台場クヌギ林の評価

台場クヌギの樹幹から流れる樹液にはオオクワガタ、オオムラサキが集まり、またクヌギの葉にはオオミドリシジミやウラナミアカシジミが生息するなど当地の台場クヌギ林は生物多様性の豊かさでも高く評価されている。

現存する古文書・古書籍による実証性、平安時代までさかのぼる歴史性、茶道との結びつきによる文化性、現在も里山景観が見られるという稀少性、台場クヌギという他の地域には見られない特殊性、大都会から1時間程度で見ることができるという利便性、上述の生物多様性などを総合的に評価すると、当地域の里山台場クヌギ林は日本一の里山といっても過言ではない。

宇都宮大学農学部附属演習林の森林認証

大島 潤一 (おおしま じゅんいち、宇都宮大学農学部附属演習林)

はじめに

宇都宮大学農学部附属演習林は、船生演習林と日光演習林の二つの演習林からなる教育研究施設である。二つの演習林はそれぞれ、気候・地形・地質・植生などの立地環境条件、森林の成長過程や構成が異なり、多様な森林生態系を有している。この特性を生かして、森林に関する基礎的・応用的な調査・研究が行われ、学生が実習・実験などを通じて森林科学の総合的体系の理解を深めるフィールドとして活用されている。

船生演習林は、平成26年11月12日に大学単独では初めてとなる「SGEC（緑の循環認証会議）」森林管理認証を取得した。そこで、今回は船生演習林の概要と森林認証取得の経緯等について紹介する。

船生演習林の概要

船生演習林は、栃木県宇都宮市から北に約30kmの塩谷郡塩谷町の中部、標高260～597mに位置し、形状は南北約5km、東西約4kmの弓状で、面積は538haである(図-1)。演習林全域が利根川水系鬼怒川流域に含まれている。国道461号線により南北に分断され、国道より北側を北団地、国道より南側を南団地に区分される。主要な樹種は植栽されたヒノキ、スギの他にアカマツ、コナラ、ヤマザクラ、クリ、シデ等で、自然植生としてはアカマツ-ヤマツツジ群落とされる。ヒノキを主体として更新された林分は300haを超え、針葉樹林の割合は約70%を占めている。

昭和12年に国有林から所管換を受け、宇都宮大学の前身宇都宮高等農林学校林学科の演習林として設置され、80年におよぶ歴史を有している。昭和29年に第1次経営計画を編成し、翌30年からヒノキ、スギを中心とした直営生産事業を開始している。現在は平成22年に策定した第7次経営計画に基づき、ヒノキ・スギの伐期を60年に設定し、管理経営を行っている。現在でも直営生産にこだわり、林業における施業技術、管理

技術の開発・継承を続けている。また、林道の開設・維持管理等も直営で行っており、現在、船生演習林内の路網の総延長は23,784mで、路網密度は44m/haと高い路網密度を有している。整備された路網は、持続的な森林資源生産や教育研究のために活用されている。



図-1 船生演習林の全体図

宇都宮大学キャンパスから船生演習林までのアクセスが良いため、演習林の利活用の頻度が高く、森林科学の学科過程に組み込まれた樹木学、育林学、森林土壌学、森林測量学、森林計測学、森林資源利用学、森林工学、森林計画学等の実習や農学部コア実習が行われている。特に森林工学実習では、演習林が保有する高性能林業機械を活用し、高性能林業機械の操作実習を行っている。また、学部学生の卒論や大学院生の論文のための調査研究、教員の試験研究などが行われており、教育研究活動に必要な実習林や試験林、見本林なども充実している。

一方で、毎年4月には樹木園でカタクリ祭りを開催し、一般市民に演習林を開放している。また、小学生を対象とした森林体験教室、県内の高校生を対象としたアグリカレッジの講義やタイ・カセサート大学などとの国際連携実習を実施したり、森林ボランティア活動にも対応するなど積極的に社会貢献活動も行っている。

森林認証取得の経緯

演習林は、森林教育における実習研究の場であり、実



図-2 ヒノキ長伐期施業林



図-3 生産されたヒノキ認証材

習や研究を通して学生に健全な森林経営の必要性を認識させることを目的に船生演習林の森林認証取得を目指した(図-2)。

平成26年6月に認証機関である(一社)日本森林技術協会にSGECの森林管理認証の審査を申請し、同年9月に審査を受けた。審査は、森林施業の実行現場の確認、書類の確認及び利害関係者などの意見聴取により実施され、SGEC森林管理認証基準である「認証対象森林の明示及びその管理方法の確定」、「生物多様性の保全」、「土壌及び水資源の保全と維持」、「森林生態系の生産力及び健全性の維持」、「持続的森林経営のための法的・制度的枠組」、「社会・経済的便益の維持及び増進」、「モニタリングと情報公開」の7項目及び36の指標が評価された。同年11月に審査の報告を基にSGEC森林認証審査判定委員会により審議され、船生演習林のSGEC森林認証が決定された。

森林認証の効果

森林認証を取得した効果として、第一に船生演習林のイメージアップが挙げられる。第三者機関の審査を経て森林認証を取得したことで、演習林の持続可能な森林経営や環境貢献が対外的にも客観的に説得性、一貫性及び信頼性を持って証明されたことになり、社会からの高い信用や評価の獲得に繋がっている。

第二の効果として、演習林教職員の森林経営への意識改革が挙げられ、森林認証の取得が演習林教職員全員の大きな自信と誇りになり、演習林の管理意欲が大きく高揚した。審査時の指摘事項に対しても職員の自発的な提案により早急に改善が図られ、演習林の適正な管理運営

の推進や適切かつ円滑な事業の実施に繋がっている。

第三の効果として、演習林材の市場価値の向上が挙げられる。演習林のヒノキ材は、栃木県優良木材展示会で毎年受賞しており、以前より材の緻密さと美しい色艶から良質材として定評があった。森林認証を取得したことで、栃木県内のCoC認証事業体から演習林材の購入希望の照会があり、木材市場における演習林材の優位性をさらに高めることができた。また、演習林材の販売も共販所を通じた間接販売だけでなく、CoC認証事業体を対象とした直接販売が可能となり、演習林の収益増加に貢献している(図-3)。

今後の展望

今後は、森林認証を演習林における実習教育や社会のために活用していくことが重要である。まずは、森林の持続的保管理及び健全な森林経営に基づく実践的教育を通じて、学生の森林管理に対する認識の向上と森林・林業に関する専門技術者の育成を図る必要がある。また、演習林材のブランド化を展開し、認証材販売を通して森林認証の普及啓発に取り組み、森林認証に対する消費者の関心を高める必要がある。森林認証への消費者のニーズが、環境に配慮した持続可能な循環型社会の構築のために不可欠である。

最後に、演習林の使命のひとつには林業の改善発達に貢献することがあり、演習林では、森林認証の取得で立証された演習林の持続的な森林経営や管理を活用して、林業の健全な発展のために貢献していきたいと考えている。

スギ・ヒノキ枯死木内における 3種の寄生バチの「動向」 —寄主を殺すか、生かしておくか—

浦野 忠久 (うらの ただひさ、森林総合研究所)

シリーズ
うごく森 26

1. はじめに

森林内で発生する枯死木の分解過程、この森の「うごき」の初期段階には数多くの昆虫が関与している。その中には木材自体を食べるもの以外にも、昆虫を食べるものもいる。これらの昆虫は1本の枯れ木の中でさまざまな関係を作り上げている。この食うものと食われるものとの関係は、通常1対1ではなく、1種の餌昆虫を多くの捕食者が利用している。この場合、どの捕食者がどの餌種を食べているのかや、捕食者同士の競争関係など、複雑な仕組みになっている。しかし寄生バチに代表される捕食寄生者は、1個体が食べるのは1個体の餌昆虫(寄主)と決まっているため、餌種と寄生バチ間の対応関係が理解しやすく、またハチ種間の関係も把握しやすくなる。今回は、スギ・ヒノキに穿入するヒメスギカミキリ(*Callidiellum rufipenne* (Motschulsky))をめぐる3種類の寄生バチの研究について述べる。

2. ヒメスギカミキリと3種類の寄生バチ

ヒメスギカミキリは、成虫の体長5～14mmのカミキリムシで、スギ・ヒノキの比較的新鮮な枯死木を餌として発育する。春にスギやヒノキを伐倒すると、どこからともなくこの虫が飛んできて樹上でしきりに交尾、産卵するのを見ることが多い。成虫は樹皮の隙間に産卵し、幼虫は樹皮下を穿孔しながら内樹皮を食べて発育し、夏に成熟した幼虫は辺材の浅いところに穿入して蛹室を作り、その中で蛹を経て成虫になってから越冬する。そして春になると成虫は野外へと脱出し、交尾、産卵行動を行う。

本種を寄主としているのがヨゴオナガコマユバチ(*Doryctes yogoi* Watanabe)、ヒメスギツノコマユバチ(*Baeacis semanoti* (Watanabe))、*Rhimphoctona* sp. (ヒメバチ科の1種)の3種である(写真-1(a) - (c))。見た目はどれも黒一色で、大きさもそれほど変わらず、雌の腹端には長い産卵管があ

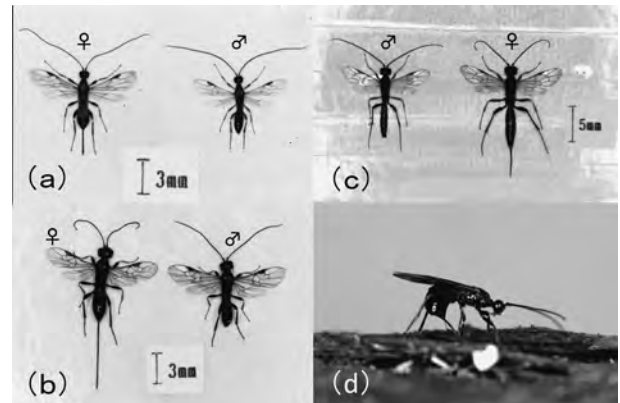


写真-1 (a) ヨゴオナガコマユバチ成虫。(b) ヒメスギツノコマユバチ成虫。(c) *Rhimphoctona* sp. 成虫。(d) 樹幹上で産卵するヨゴオナガコマユバチ。

り、雌雄の区別は容易である。上記3種がヒメスギカミキリを共通の餌として、いかにして共存しているのかを考えていきたい。余談であるがヨゴオナガコマユバチという和名は、採集者である林業試験場北海道支場(現:森林総合研究所北海道支所)長の余語昌資氏に因んでつけられた(Watanabe 1954)。

3. 3種の寄生バチの寄生様式

寄生バチが寄主昆虫に寄生する方法は幾通りかに分けることができる。まず寄主の体内に寄生するか、外部に寄生するかによって内部寄生と外部寄生に分けられる。3種とも雌成虫が樹幹の外側から樹皮下にいる寄主を探索し、産卵管を樹皮下に挿入して寄主に産卵する(写真-1(d))。このとき、寄主に産卵した後も生かしておく方法をコイノバイオント(koinobiont, 飼い殺し寄生)、寄主に毒液を注射して動けなくしてしまう方法をイデオバイオント(idiobiont, 殺傷寄生)と呼んでいる。本文の3種では、ヒメスギツノコマユバチと*Rhimphoctona* sp. は内部寄生のコイノバイオント、ヨゴオナガコマユバチは外部寄生のイデオバイオント

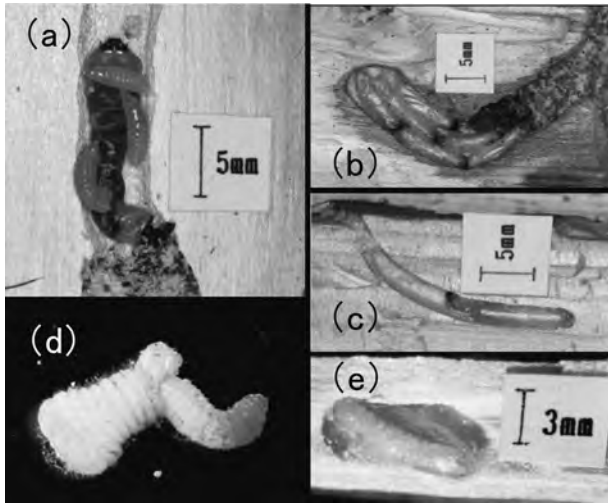


写真-2 (a) ヒメスギカミキリ幼虫に寄生するヨゴオナガコマユバチ幼虫 (3 個体)。 (b) 樹皮下のヨゴオナガコマユバチ繭 (6 個体)。 (c) ヒメスギカミキリ蛹室内の *Rhimphoctona* sp. 繭。 (d) ヒメスギカミキリ幼虫体内から脱出するヒメスギツノコマユバチ幼虫。 (e) ヒメスギカミキリ蛹室内のヒメスギツノコマユバチ繭。

である。また寄主 1 個体に産み付ける卵の数によって単寄生 (1 個体のみ) と多寄生 (複数個体) に分かれる。内部寄生の 2 種はほぼ例外なく単寄生であるが、ヨゴオナガコマユバチは寄主サイズが大きい場合は多寄生となる (写真-2 (a))。ヨゴオナガコマユバチはスギの害虫として知られるスギカミキリの幼虫にも寄生するが、ヒメスギカミキリは名前の通りスギカミキリより小さい。したがってヒメスギカミキリに寄生する場合は単寄生が多く、スギカミキリに対しては多寄生になる場合が多い。このような様式を随意多寄生と呼んでいる。

4. 3 種の寄生バチの生活史

寄生様式の異なる 3 種の寄生バチは、その生活史も互いに異なっている (図-1)。まずヨゴオナガコマユバチは樹皮下を穿孔する比較的成長したヒメスギカミキリ幼虫に産卵寄生し、寄主を摂食し終えたハチ幼虫は糸を吐いてその場で繭を作る (写真-2 (b))。これに対し内部寄生のコイノバイアント 2 種が産卵するのは、卵あるいは孵化して間もないヒメスギカミキリである。両者の違いを考える上で重要な点は、イデオバイアントであるヨゴオナガコマユバチは寄主を動けなくしてしまうため、寄主に産卵した時点で子供の摂食可能な餌の量がすべて決まってしまうのに対し、コイノバイアント 2

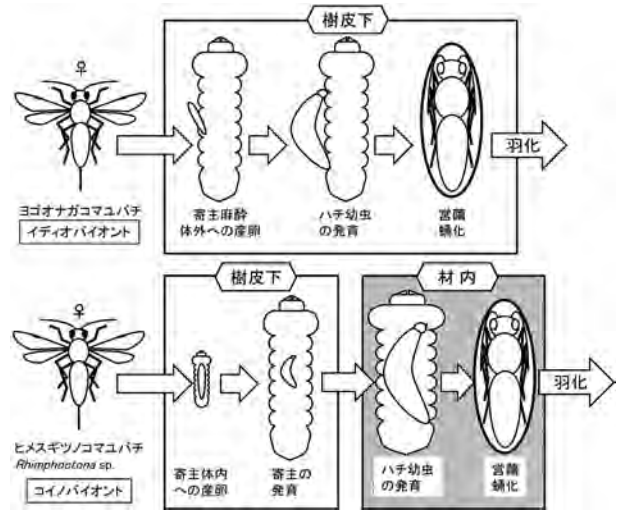


図-1 寄生バチ 3 種の寄生様式と発育経過

種に産卵された寄主はその後も発育を続け、実際にハチ幼虫が寄主を食べるのは何か月も先になる、ということである。

コイノバイアントに寄生されたヒメスギカミキリ幼虫は通常と同じく内樹皮を食べて成長し、材内に穿入して蛹室を作る。この間寄主体内のハチは、若齢幼虫の状態の数か月間待機している。材内の蛹室は樹皮下に比べて外界との隔離度合いがより高く、より安全な場所といえることができる。寄主が蛹室を作った後で体内のハチ幼虫は急速に成長し、寄主を食べ尽くした後、蛹室内に繭を形成 (営繭) する。このタイミングは 2 種の寄生バチ間で異なっている。すなわち、*Rhimphoctona* sp. は秋までに寄主を食べ尽くして営繭し (写真 2 (c))、繭の中で越冬するのに対し、ヒメスギツノコマユバチは若齢幼虫 (推定) のまま寄主体内で越冬し、翌春になってから寄主摂食を開始する。

コイノバイアントの 2 種のハチが寄生したヒメスギカミキリが穿入しているスギ・ヒノキ丸太を冬に割材すると、材内蛹室の中にはヒメスギカミキリ成虫、幼虫および *Rhimphoctona* sp. の繭を見ることができる。正常なヒメスギカミキリは夏に蛹室内で成虫になり、そのまま越冬するので、ここで見られる成虫は健全個体ということになる。それではなぜ幼虫が混ざっているのかというと、これこそがヒメスギツノコマユバチに寄生された個体だからである。ヒメスギツノコマユバチは寄主の発育をコントロールし、蛹への脱皮を妨げているのである。割材して取り出したヒメスギカミキリ幼虫を 25℃

で加温保存したところ、数日後に体内からヒメスギツノコマユバチの幼虫が出現した(写真2(d))。脱出したハチ幼虫はさらに1日ほどかけて寄主を外部から摂食した後に営繭した(写真-2(e))。両者の越冬方法を比較すると、動けない繭の状態よりは、動くことのできる寄主幼虫の中で過ごした方が、外敵から身を守る上では有利である。ただし同じヒメスギカミキリ幼虫に寄生しているにも関わらず、成虫のサイズは *Rhimphoctona* sp. の方が大きい。これは *Rhimphoctona* sp. が、寄主幼虫が成熟してサイズが最大となった時期に摂食するのに対し、ヒメスギツノコマユバチ幼虫が寄主を摂食する越冬後までには、乾燥の影響などにより寄主幼虫サイズはやや縮小しているものと考えられる。したがって幼虫期に摂取可能な栄養の差が2種間のサイズ差に影響していると考えられる。

3種の中では、ヨゴオナガコマユバチのみが年に2世代繰り返すことができる。春に羽化したヨゴオナガコマユバチ越冬世代の雌成虫が産卵する6月は、ヒメスギカミキリの多くが樹皮下幼虫であるため、好適な寄主が数多く存在する時期である。ところがその次の第1世代が羽化、産卵する7~8月になると、ヒメスギカミキリ幼虫の材内穿入が始まって樹皮下の幼虫は個体数が少なくなる。ヨゴオナガコマユバチの産卵管は材内の寄主幼虫には届かないので、この時期にはヒメスギカミキリが利用しにくくなる。他の穿孔虫を利用している可能性もあるが、第1世代の一部の幼虫が長期休眠して次の越冬世代と同時期に羽化することによって、個体群の減少を防いでいるらしいことが明らかになった(浦野1998)。この調査では、第1世代の羽化時期である7月下旬と8月上旬に、それぞれ供試木を剥皮して樹皮下のハチの状況を調べた。その結果、ハチのほとんどは繭の状態で、60%以上はすでに羽化後の空の状態であったが、17ないし23%の個体は中に幼虫が入っており、そのまま常温で保存しても羽化しなかった。これらは10℃で約4か月間保存した後再び温度を上げることで、成虫を羽化させることができた。このことからこれらの個体は休眠状態にあったものと推定された。

5. ヒメスギカミキリをめぐる3種の寄生バチの関係

3種類のハチはヒメスギカミキリという餌資源をめぐる競争する関係にあると考えられる。コイノバイオントの2種は寄主が卵あるいは若齢幼虫の段階で産卵

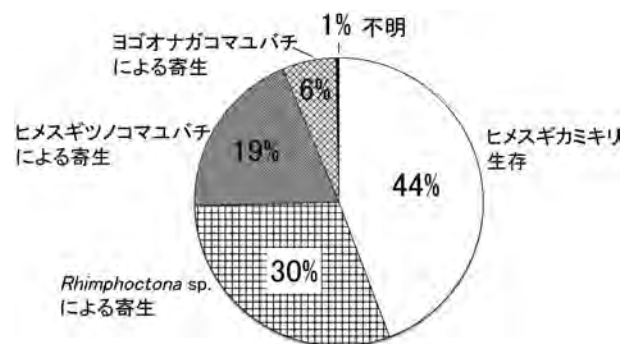


図-2 各種寄生バチのヒメスギカミキリに対する寄生率

し、樹皮下で寄主は生かした状態で発育するのを体内で待ち続ける。もしこの間に寄主がヨゴオナガコマユバチに寄生されたらどうなるだろうか。ヨゴオナガコマユバチ雌成虫の注入する毒液によって寄主は麻痺して発育不可能となり、その後には孵化する幼虫によって寄主もろとも食われてしまう。つまりイディオバイオントとコイノバイオントの間には間接的な食う-食われる関係があり、同一寄主をめぐる前者が圧倒的に有利である。ならばヨゴオナガコマユバチのいる場所では、ヒメスギツノコマユバチと *Rhimphoctona* sp. は個体群を維持していくことができるのであろうか。

図-2は京都市内において、ヒメスギカミキリに産卵させたスギ丸太を林内に放置して、各種の寄生バチに寄生させた後、冬季に割材してヒメスギカミキリの生死とハチの寄生状況を調査した結果である。全体では50%強のヒメスギカミキリがハチの寄生を受けていたが、意外なことに同じ丸太の中で3種の寄生バチが共存する形になっている。しかもヨゴオナガコマユバチの寄生率はコイノバイオント2種よりも低かった。ヒメスギツノコマユバチが寄主の蛹化を阻止していることを先に述べたが、コイノバイオントの幼虫は、自らの寄主がヨゴオナガコマユバチに寄生されにくくなるように寄主をコントロールしているのであろうか。

図-3(a)は図-2で示したのと同じスギ丸太における、3種の寄生を受けたヒメスギカミキリ幼虫の平均頭幅を示している。この値はヨゴオナガコマユバチが最も小さかったが、同時にばらつきが大きく、これは様々なサイズの寄主幼虫が本種の寄生を受けたためである。図-3(b)および3(c)は同じ丸太を6月から8月にかけて半月ごとに剥皮調査した結果明らかになった、ヨゴオナガコマユバチの樹皮下における寄生率、ヒメスギカミキリ幼虫の平均サイズ(頭幅)および材入率を示している。

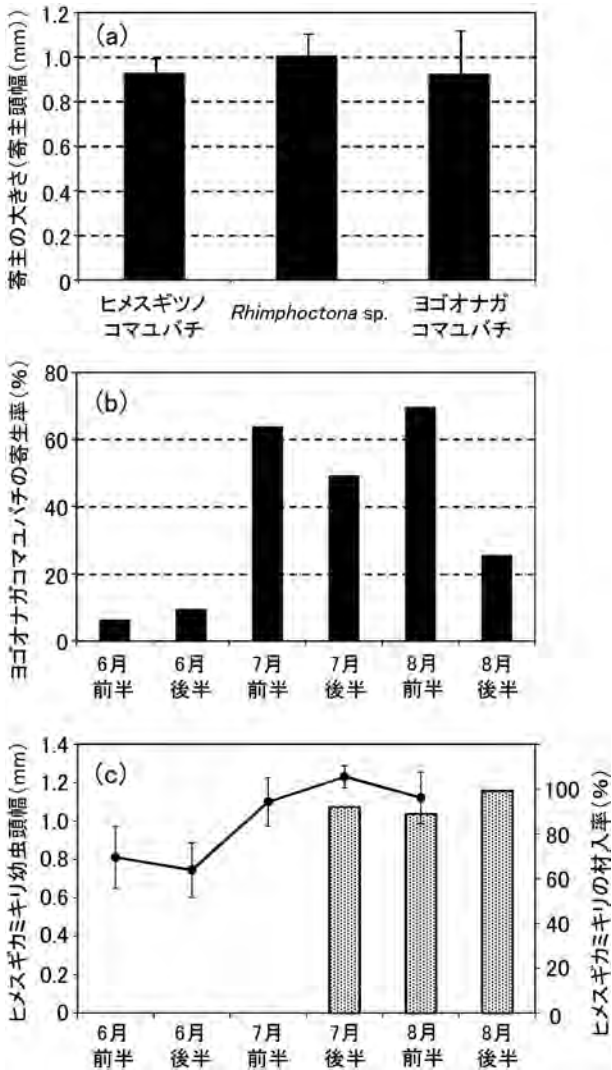


図-3 (a) 3種寄生バチの寄生を受けたヒメスギカミキリ幼虫の大きさ(頭幅)(平均±SD)。(b) 6~8月の野外に放置したヒメスギカミキリ穿入丸太樹皮下におけるヨゴオナガコマユバチ寄生率。(c) bと同一の丸太におけるヒメスギカミキリ幼虫の大きさ(頭幅:折れ線)(平均±SD)と材入率(棒)。

寄主幼虫の頭幅が0.8mm前後と小さい6月には、ヨゴオナガコマユバチの寄生率も低い。7月になると寄主頭幅は1.1~1.2mmとなり、寄生率も上昇している。ただし7月後半以降になると寄主の材入率が高くなる。先にも述べたようにヨゴオナガコマユバチは材内に穿入したヒメスギカミキリ幼虫には寄生できないため、この時期は寄生率が高いとは言え、寄生可能な樹皮下の寄主幼虫はごくわずかとなる。したがってヨゴオナガコマユバチがヒメスギカミキリを効率よく利用できる時期はほ

ぼ7月前半に限定されると言えるであろう。

一方、図-3(a)に示したコイノバイオント2種の寄主は、材内蛹室内の成熟幼虫である。それらの平均頭幅は0.9ないし1.0mmと、図-3(c)の材入幼虫の平均値(1.1~1.2mm)より小さい。このことから推測されるのは、コイノバイオント2種が寄生した寄主幼虫は、ヨゴオナガコマユバチの寄生に適したサイズに達する以前に材入するのではないかということである。そうすることによって樹皮下の寄主しか利用できないヨゴオナガコマユバチの寄生をうまく回避することができるものと考えられる。

6. おわりに

筆者が京都市内で調査したヒメスギカミキリの天敵相は、上記3種の寄生バチを中心とした比較的単純な構成を示していたため、これらの種間関係にある程度解明できるだけのデータを取ることができた。しかし樹木穿孔虫の寄生バチの生態は、重要害虫に寄生する種を除いてほとんど知られていない。わが国においては、マツ材線虫病やナラ枯れが猛威を振っていることもあり、枯死木は病害虫の発生源と捉えられ、除去すべきものという意見が強くあるように感じられる。しかし上記のような病害虫の被害木を除けば、枯死木内の生物多様性は昆虫のみならず菌類等も含めて非常に高く、森林の健全性を維持するために枯死木の保管理が必要だという認識も深まりつつある(Stoklandら2014)。穿孔性昆虫の寄生バチの研究は、従来からの害虫の生物的防除のみならず、上記のような新しい視点の研究にも貢献することができるであろう。

引用文献

Stokland JF, Siitonen J, Jonsson BG (2014) 枯死木の中の生物多様性(深沢遊・山下聡訳). 京都大学学術出版会
 浦野忠久(1998) ヒメスギカミキリ穿入ヒノキ丸太における寄生バチ相. 第109回日本林学会講演要旨集: 227
 Watanabe C (1954) Hymenopterous parasites of the longicorn beetle, *Semanotus rufipennis* Motschulsky. *Insecta Matsumurana* 18: 79-83

非破壊で生立木の腐朽をはかる

山田 利博 (やまだ としひろ、東京大学大学院農学生命科学研究科)

林業、公園樹も含めた街路樹、天然記念物クラスの貴重木、それぞれ管理の目的、方法は異なるものの、立木のまま内部の腐朽（以下、空洞を含む）の状況を知りたいという要望がある。林業分野での利用は少ないようだが、都市部では近年多くの街路樹の腐朽診断（広く倒木の危険性を知るためということ）で危険度診断とも呼ばれる）が行われている。こうした生立木の腐朽診断については、本シリーズで山口（2001）が破壊的から非破壊的までの幅広い手法について紹介している。その後、主に非破壊的な診断法について機器の開発、改良が進んだのでここで解説したい。なお、個々の機器や手法については、山田ほか（2011）、山田（2014）に詳しく紹介されているので参考にさせていただきたい。

腐朽診断は主に密度や強度の低下といった腐朽部の物理的な性質を利用する。例えば、錐状のプロープの貫入抵抗は最も広く使われている指標で、機械的強度を測定し対象とする部位の腐朽程度を直接知ることができる。しかし、プロープは軸径 1.5 mm と細いものの材の奥まで傷が付くことは避けられない。それに対して、非破壊での腐朽診断は間接的な方法になり対象部位の強度や密度を直接測ることができない上に機器は高価であるが、樹幹横断面での腐朽の位置、形状、大きさが大まかに測定できるようになって使われる頻度が増えている。こうした非破壊的な腐朽診断法としては電磁波を利用する方法と音波を利用する方法が主に使われている。

電磁波を利用する方法

使われる電磁波は、波長により電波の領域（レーダー）と放射線の領域があり、波長が比較的長い電波では腐朽部と健全部との界面で反射する波の到達時間や強度を指標として、波長の短い放射線では腐朽部で透過率が高くなることを指標として診断を行う。

レーダーでは 200 MHz ～ 1.5 GHz の周波数が使われる。周波数が高いほど測定可能な深度が小さくなるが分解能は高くなり、街路樹の診断では 700 ～ 900 MHz 程度が適当とされる。ただ、今のところデータの判別に専門的な知識を要しユーザーが単独で診断することは困難である。同じ機器をジオレーダーとして地中探査用に

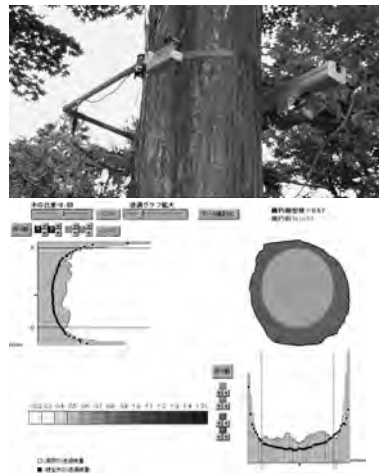


図-1 γ 線による腐朽診断の様子(上)と診断画面(下)

グラフの棒は実際の γ 線透過量、黒点は健全な場合の透過量、断面図の色は材の比重(凡例の左端0～右端1.5)

も使うことができるが、腐朽診断の場合はレーダーアンテナを手に持ち樹幹を一周させて樹幹横断面内の腐朽の位置や大きさを測定する。

放射線では、まずX線が使われたが、コストや被ばくの危険性のため研究用途にとどまり、現在では現場で簡単に使える γ 線を用いた機器が実用的に使われている。研究用途としては本格的なCTも作られたが、本器は2方向からのスキャンによって横断面図を描いている(図-1)。線源としては3.7 MBqのセシウム137を用い、測定可能最大直径が60 cm、1.3 mの機種がある。

音波を利用する方法

音波の共振周波数を求める方法と伝達速度を求める方法があり、打撃時の振動(ストレス波)がよく使われる。横打撃共振法は、樹幹をハンマーで打撃して拾った音から共振周波数を求めるだけであり、使用条件にいくらか制限があるものの、毎木調査に使うことができるほど簡便かつ機器も安価である。測定できる直径は20～100 cm程度であるが、外傷や節がなく通直という条件では精度も高い。本法は材質(ヤング率)が同じなら共振周波数と直径の積が一定であり、腐朽が入ることでこの値が低下することを利用している。打撃部横断面の腐朽の進展程度や位置、大きさは個別には分らないが、腐朽の状態を総体として知ることができる。

ストレス波伝達速度法は、ハンマーで打撃して振動を発生し、その伝達速度が腐朽部で低下する、あるいは腐

朽部を迂回することで見かけ上低下することを利用する。伝達速度を一方向で測定する方法がまず使われ、現在でも限られた用途で使われることがある。ただし、音速は健全な樹体内でも樹種や直径などによって異なるため、基準となる値がしっかりしていないと診断は難しい。近年は多数のセンサーを用い簡易 CT としての表示が可能な機器がいくつか開発され、改良が進められて利用が拡大している。これらは樹幹横断面での腐朽部の位置や形状、大きさを二次元的に表示できるだけでなく、樹幹横断面での相対的な音速の分布を知ることができるため樹種による伝達速度の違いによらず診断が可能になる。

また、派生型として音の伝達速度に替えてインピーダンスの樹幹横断面内分布を測定することのできる機種もある。これは樹種にもよるが材変色腐朽部の電気抵抗が低下するという現象に基づく。

打撃音でなく発振波を用いる音響波伝達速度法としては、超音波発振器を用い一方向の音の伝達速度を測定する方法が使われてきたが、最近、わが国でトモグラフが開発された(図-2)。発振波の場合は周波数を変えることで直径の異なる樹木に対応することができるが、さらに本器は疑似ランダム波という特殊な波形を用い、高周波でも減衰を小さくし伝達距離を確保している。

電磁波と音波の得失

音波の方が大径木に強く直径で最大 5m 程度まで測定可能である。また、電磁波は水分の影響を受けやすいため含水率が変わる心材など樹幹内の水分分布に注意を払う必要がある。

しかし、電磁波の場合はセンサーを材に密着させる必要はなく完全な非破壊検査ができるが、音波の場合は打撃によるダメージや伝達をよくするために使用する針やネジのため完全な非破壊検査とは言えない。さらに、電磁波は樹体内を直線状に進むためどこを測定しているかが明確であるが、音波の場合は腐朽部を迂回するため、測定した信号がどの経路を辿ったかは分からず、原理的に腐朽部の形状を詳細にトレースすることはできない。ただし、街路樹での診断の目的は倒木の危険を評価して、伐採、補強といった管理に役立てるためであり、全体としての腐朽状況が分かれば腐朽の位置や形状、進展程度を正確に知る必要性は低い。

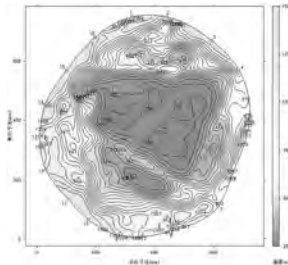


図-2 音響波による腐朽診断の様子(センサー、上)と診断画面(左)色は見かけの音速(凡例の上端 1500 ~ 下端 250 m/秒)

危険度判定

診断の結果、どの程度の腐朽があるかが分かると、次にその木の処置を決めることになる。貴重木の場合は木を残すため安全性を高める処置をとるが、一般的な街路樹の場合は危険度によっては伐採することになる。危険度の判定基準はいくつか提案されているが、最も広く使われているのは、横断面上の腐朽部の面積が 50% を越えると幹折れの危険性が高くなるというものである。もちろんこの値は目安であり、樹木の形状、生育環境、外傷・開口部の有無や大きさなどによって変わる。

腐朽部の断面積あるいは割合を測定するのはこのような基準があるため、トモグラフィの場合はもちろん、プローブを直線状に差し込む貫入抵抗の場合も、同一断面上で複数箇所(樹木の直径にもよるが 4 か所とか 8 か所)を測定して腐朽面積を推定する方法が用いられる。

以上のように種々の原理に基づいた手法が開発されているが、それぞれの特徴や限界を理解して使用することが肝要である。一つの手法での診断で確実性が不十分なときは、異なる原理に基づく複数の手法を用いると信頼性が高くなる可能性もある。

参考文献

- 山田利博ほか(2011) 特集・樹木の異常をみつける精密診断機器。グリーンエージ 451:4-32
- 山口岳広(2001) 生立木の腐朽をはかる。森林科学 32:49
- 山田利博(2014) 機器等を使った樹木の健康診断と危険度診断の方法。堀大才編著、樹木診断調査法、講談社、286-298

森林境界明確化支援システムの開発

小林 裕之 (こばやし ひろゆき、富山県農林水産総合技術センター森林研究所)

1. はじめに

植林からの長時間の経過や所有者の高齢化などにより、森林の所有者が不明確になり、集約的な施業や路網整備の妨げになってきています。

これまで富山県森林研究所では、森林計画図やオルソ写真（空中写真のひずみを除去したもの）、林班、小班情報などを無料のGIS（地理情報システム）ソフトウェア用に整備し、関係機関に配布してきました（小林2011）。

また、新川（にいかわ）森林組合は、平成23年度より森林素図（公図と登記簿を統合した、地番、地目、所有者名等が記入された図面）を作成して境界確定を目指しており（新川森林組合2012）、組合と研究所が協力して境界推定を行う条件が整ってきました。

平成23年度に新川森林組合から県庁を通じて、過去の空中写真を利用した境界推定システムの開発依頼があり、平成24年度から、当森林研究所でシステム開発を

始めました。本稿では、この森林境界明確化システムについて紹介します。

2. システムの概要

開発したシステムの概要を図-1に示します。当森林研究所では主として昭和20年代以降に撮影された過去の空中写真のオルソ変換（中心投影を平行投影に直すこと）を行っています。過去の写真に着目したのは、森林所有者が異なれば施業履歴や林相も異なり、撮影年度の異なる時系列写真からそれらの違いを判読できる可能性があると考えたからです。

ここで作成しているオルソ写真は、単写真と市町村管内図（または森林基本図）、国土地理院の標高データを使用する簡易デジタルオルソ写真です（小林2004）。また、オルソ写真やその他のデータは、県の出先機関や森林組合で表示、閲覧できるように、フリーソフトのカシミール3DやQuantum GIS（QGIS）で使えるデータ

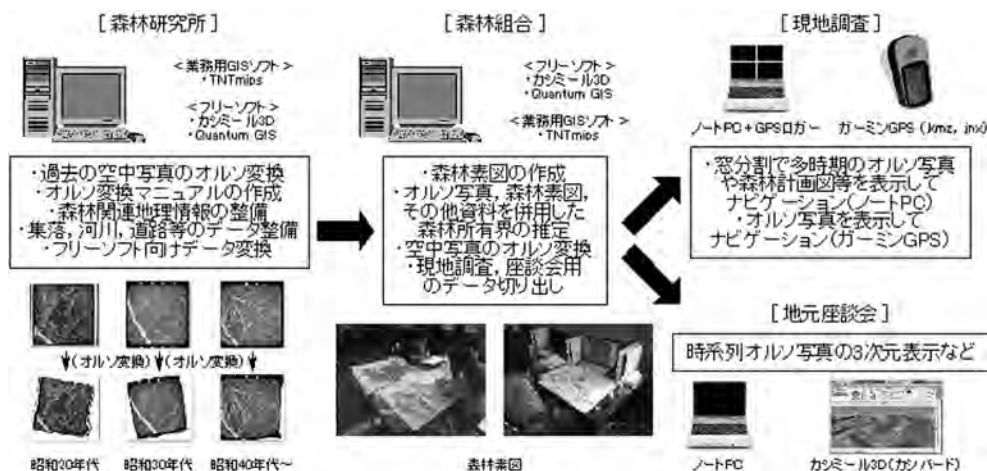


図-1 森林境界明確化支援システムの概要図

へと変換しています。森林組合では、多時期のオルソ写真を判読、比較し、森林素図等を併用して森林所有界の推定を行い、必要に応じて、現地調査や地元座談会で使用するデータの切り出し作業等を行います。現地調査では、ノート PC に GPS ロガーを無線接続し、カシミール 3D で画面を分割して、多時期のオルソ写真を同時に表示したり（図-2）、1 枚のオルソ写真をハンディ GPS で表示したり（図-3）してリアルタイムナビゲーションを行います。また、ノート PC を座談会に持参すれば、森林所有者に鳥瞰図（図-4）等をリアルタイム



図-4 カシミール 3D で作成した鳥瞰図



図-2 ノート PC での現地ナビゲーション中の画面
（カシミール 3D で 4 時期のオルソ写真を表示）



図-3 ハンディ GPS での現地ナビゲーション中の画面
（1983 年のオルソ写真を表示）

で見せることもできます。平成 25 年度には森林組合にもオルソ変換ができる業務用 GIS ソフトが導入され、森林研究所が作成したマニュアル書（小林 2013）を参考にしながらオルソ写真を作成しています。

3. システムの使用状況

平成 24 年度に作成したオルソ写真のうち、1961 年（昭和 36 年）に国土地理院が撮影したものからは、最近境界調査が行われた魚津市小菅沼地区（写真を使わずに境界決定）の測量成果（外周線）と、地拵え地の輪郭が一致する（図-6 の丸印内）ことがわかりました（図-5、6）。また、平成 24 年度に 2 回（魚津市小菅沼（図-7）、魚津市山女（図-8））、平成 25 年度に 1 回（魚津市古鹿熊（図-9、10））の現地調査を行いました。

これらの調査からは、1) 森林素図（見取り図がベース）に位置座標を与えて GIS ソフトで表示するのは難しく、オフィスで目視判読に使用する方が良いこと、2) 過去のオルソ写真を同時に複数表示し、現在位置を確認できることは非常に便利であること、3) 電子コンパス内蔵のハンディ GPS では GPS 保持者の進行方向に合わせてオルソ写真画像が回転するため非常に便利であること、4) 非力なタブレット PC よりも、ノート PC の方がオルソ写真の複数表示に適していること、などが明らかになりました。さらに、地元座談会（所有者説明会）では、鳥瞰図の表示が、所有者の記憶を呼び戻す効果が大きく、大変有用であることもわかりました（図-11）。さらに、平成 26 年度には、魚津市古鹿熊地区において境界杭を打つことができました（図-12）。



図-5 1961年撮影のオルソ写真
(測量結果なし)



図-6 1961年撮影のオルソ写真
(測量結果のポリゴンあり)



図-7 魚津市小菅沼での現地調査の様子
(タブレット PC と森林素図)



図-8 魚津市山女での現地調査の様子
(ガーミン GPS でオルソ写真を確認中、GPS を回転させると写真も回転する)



図-9 魚津市古鹿熊での現地調査の様子 1
(所有者がノート PC 画面と森林素図を比較中)



図-10 魚津市古鹿熊での現地調査の様子 2
(森林内でのナビゲーション中、耕作放棄田が樹林化した場所)

4. システム構成と操作性

開発した森林境界明確化支援システムを構成するハードウェアの例を表-1に、また、ソフトウェアの例を表

-2にそれぞれ示します。

現地調査に使用するPCは、カシミール3Dが動作するWindowsパソコンで、GPSロガーとのケーブル接



図-11 座談会で鳥瞰図に見入る森林所有者



図-12 森林組合職員による境界杭の打ち込み

表-1 本システムのハードウェアの例

ハード名	型式等	金額	特徴
PC	Windows	約 10 万円	Bluetooth 対応 液晶明、軽量
GPS ロガー	HOLUX m-241	約 1.0 万円	Bluetooth 対応
	Wintec WBT-202	約 1.2 万円	Bluetooth 対応
ハンディ	ガーミン eTrex30	約 3.3 万円	
GPS	ガーミン eTrex30J	約 6.5 万円	

表-2 本システムの GIS ソフトウェアの例

ソフト名	金額
カシミール 3D	0 円
QuantumGIS (QGIS)	0 円
TNTmips	約 85 万円

続が不要な Bluetooth 内蔵がお勧めです。ハンディ GPS は、表示画像が自動回転してくれる、電子コンパス内蔵がお勧めです。

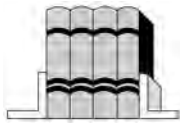
カシミール 3D については、ソフト作成者が著した解説本（例えば、杉本（2010）など）やハンディ GPS と組み合わせた林業分野での利用例が紹介されている書籍（例えば、全国林業改良普及協会編（2009）など）もあります。QGIS は外国製のソフトですが、日本語に対応しており、ウェブ上で使い方の解説もされています。TNTmips についてはオルソ写真の作成に使用しているので、オルソ変換を外注すれば購入する必要はありません。

5. おわりに

過去のオルソ写真があれば森林境界がすぐ判明するというわけではありませんが、戦後から現在に至る年代別オルソ写真を中心とした本システムは、オフィスで境界を推定する際の参考になり、また現地では GPS と連動させて過去の写真上での現在位置を確認できるなど、森林境界明確化を支援するために非常に有効であると考えられ、今後とも改良、普及に努めていきたいと考えています。

引用文献

- 小林裕之（2004）単写真と DEM を用いた簡易デジタルオルソフォトの効率的な作成方法の検討。日林誌 86：283-286.
- 小林裕之（2011）効率的な森林管理のためのカシミール 3D 用データ集の作成。富山県森林研研報 3：14-22
- 小林裕之（2013）簡易デジタルオルソフォトの作成手順書—単写真と DEM と地形図を用いた、TNTmips による作成方法—。 (http://taffrc.pref.toyama.jp/nsgc/shinrin/webfile/t1_f92b61cc64453e2be327a4b8836fc468.pdf)
- 新川森林組合（2012）境界のドラマー数万筆の山主。図面で把握したい—。林業新知識 700：18-19.
- 杉本智彦（2010）改訂新版カシミール 3D 入門編。実業之日本社 191pp.
- 全国林業改良普及協会編（2009）林業 GPS 徹底活用術。全国林業改良普及協会 157pp.



ブックス

森林教育

大石康彦・井上真理子 編著、海青社、2015年3月、256ページ、2,300円（税込）、ISBN978-4-86099-285-9（4-86099-285-7）、C3061

森林は目に触れる機会の多い身近な存在であるが、その価値や機能に対する理解の深度が多様で分かりづらい厄介な対象と言えよう。森林を理解する難しさの根底には、生態系が持つ複雑性に加え、土地の被覆として森林のある地域に人が住み、生業を展開し、地域固有の人と自然の共生関係を形成して文化を育んできた、その歴史的背景の広がりがある。また、価値のある知識や経験が個人や集落単位、地域レベルで蓄積されてきたため、森林を理解しようとするときそうした時間軸、空間軸の中でどうしてもそれぞれの個性と対峙することを求められる。さらには、森林が持つ身近さゆえに価値や機能の認識に至らないことも大きな理由になっていると考えられる。その一方で、そうした厄介な対象を扱っているにもかかわらず、高等教育において林学（森林科学）を学ぶ学生だけでなく、広く一般を対象にして次の世代に語り継いでいく方法論とその内容をわれわれが真剣に検討してきたかと言えば、多少の反省が必要であろう。それゆえ、本書は、豊富なフィールドワークを通じ森林、樹木をよく知る研究者の手によって著された初めての森林教育の書籍と位置づけられ、明らかに、筆者が前文で「一里塚になれば」と記し謙遜する以上の価値がある。

さて、内容は、理論編と実践・活動編の二部によって構成される。まず、理論編は豊富な文献資料と精緻な分析を通して、森林教育を学校教育、社会教育、環境教育、野外教育の様々な視角によって捉え直し、森林教育の立脚点を明らかにした点がきわめてユニークであり、森林教育の今後を方向づけるものとなっている。次に、実践・活動編は現場における森林教育活動の現状を詳述しつつも、現

場が抱える悩み、課題、論点を整理した上で課題解決にむけた方法を提案し、教育、研究としての森林教育が向かうべき方向性をやはり指し示している点で示唆に富む。森林教育を研究したい、実践したいという人には両方の部を注意深く読むことをお勧めする。

最後に、本書が出版された意義について、2011年の東日本大震災と自然保護の視点から触れておきたい。私の主観では、3月11日の震災は人が自然の恵みと脅威にどのように向き合い享受するかを考え、日本人の生き方、価値観の転換点とすべきである。わが国のエネルギーをどのように自給するのか、法令や科学が縦割り、個別の専門領域を形成して分断して捉えてきた森、川、里、海の連環をどのように再構築するかが求められている。その意味で、総合的な森林の魅力や価値をどのように伝えたらよいのかを今、提案し投げかけたことに大きな意義がある。また、地球温暖化や生物多様性など自然保護に関わる国際的な枠組み、議論の中で、森林の取り扱いはいきわめて重要な事項であり、国民的議論を喚起し、合意形成を図ることも求められている。個々人が森林について改めて考える機会とするためにも本書を手にしていただきたい。

山本清龍（岩手大学農学部）

森林環境 2015 特集 進行する気候変動と森林 ～私たちはどう適応するか

森林環境研究会編著、松下和夫・福山研二責任編集、公益財団法人森林文化協会、2015年3月、188ページ、1,944円（税込）、ISBN978-4-9980871-0-6

「森林環境」は2004年から毎年発行され、巻頭論文、特集、トレンド・レビュー、コラム、緑のデータ・テーブルから構成される。通算12号目の本号は、京都議定書の発効前後の第1～2号（2004～2005年）以来10年ぶりに気候変動を扱う。IPCC（気候変動に関す

る政府間パネル）が2014年に公表した第5次評価報告書（AR5）では、気候変動の緩和（mitigation）に加えて適応（adaptation）の記述が大幅に増えた。これを背景に、本号の責任編集者の松下和夫氏は、はじめにて、IPCCによる適応策の定義『温暖化の影響をできる限り回避し、減少させるように地域の自然システムや社会の仕組みを改善する方策』を示し、人口減少など気候変動以外の変化との相乗影響への対応や、地域ごとの施策が中心といった、緩和策とは異なる適応策の特徴を簡潔に整理する。

巻頭論文にて中静透氏は、気候変動の森林生態系や生物多様性への影響を、1) 生物の分布の移動と種の絶滅、2) 生物季節の変化、3) 生物間相互作用の変化、4) 生態系の機能およびサービスの変化の4つにまとめる。そして、予測には不確実性が高く、連続的な変化と閾値（ティッピングポイント）を超えると不可逆になるレジームシフト（例えば種の絶滅）があり、人為影響が複合効果をもたらすと指摘する。そこで、適応策では温暖化のみの影響を見極め、森林の保全や拡充によりレジリエンス（抵抗力）を高めつつ、種毎のレフュージア（退避地）の情報整備や、影響予測モデルの高解像度化等が重要と指摘する。

次に、特集記事には多様な話題がみられる。ここでは森林に関わる論説を中心に紹介する。AR5の概略や、適応策をめぐる国内外動向の紹介に続き、田中信行氏は、温暖化の影響が自然林では天然更新を通じた構成種の優先度や組成変化に現れ、種間競争が排除された人工林では主に病害虫と樹木成長に現れると整理する。そして、分布推定モデルにもとづき、種の分布域の南限と北限では異なる適応策が必要と指摘する。廣田充氏は、成熟林にも炭素吸収能力があるのはギャップ等により多様な林齢が同所的にみられるためという仮説を紹介する。井田秀行氏は、雪国の古民家の構造材に根曲がりブナ材が用いられたり、里山林の手入れや木材乾燥等にも地域毎の伝統的知識があることに適応策を考えるヒントがあると述べる。次に、自治体施策に適応策が少ないことや、農山村での適応策

の紹介記事に続き、中村太士氏は、自然資源にもとづくグリーンインフラを温暖化や人口減少等への適応策に活用すべきと指摘する。田中伸彦氏は、観光活動における排出削減等の緩和策の重要性を述べた上で、観光活動にとっては気候変動よりも人口減少や国民の余暇活動の嗜好変化による影響が大きく、ハイブリッド型の適応策が必要と指摘する。最後に2015年末予定のCOP21（気候変動枠組み条約第21回締約国会議）に向けた日本への期待と課題の記事がある。

トレンド・レビューには4つの記事が

ある。一つ目は直交集成板（CLT）への木材需要増からの期待と、資源の持続性や地域特性への配慮の必要性である。二つ目は震災復興の防潮堤が人と自然の繋がりや渚の生態系を遮断したという問題提起である。三つ目は持続可能な開発目標（SDGs）、四つ目は間伐材活用に地域通貨を絡めた「木の駅」運動の紹介である。コラムでは、2014年9月に86歳で逝去された経済学者の宇沢弘文氏が提唱した社会的共通資本の概念が紹介される。最後に緑のデータ・テーブルでは、前年の朝日新聞を中心とする森林に関わ

る主な記事が一覧できる。

緩和策に比べて認識度が低い適応策を多角的に論じる本書は、気候変動対策を考える「たたき台」として示唆に富む。本書で複数の著者が指摘するとおり、より確実性が高い人口減少等との相乗影響への対策が求められる。地域ごとの様々な環境問題やまちづくりに関心のある方々にも適応策の考え方は参考になるだろう。是非一読を薦めたい。

松浦俊也（森林総合研究所）

人工林の壮大な野外実験

来田 和人 (きた かずひと、北海道立総合研究機構林業試験場)

北海道では、戦後間もない拡大造林期に植えられたカラマツが主伐期に入った。少し遅れて植栽のピークを迎えたトドマツも間もなく主伐期に突入しようとしている。最後に植栽のピークを迎えたアカエゾマツは今、間伐期を迎えている。戦後の造林樹種の変遷は大面積造林による病獣害の大発生によるところが大きい。カラマツの植栽は先枯病と野鼠害で下火となり、トドマツは枝枯病の発生が問題となりアカエゾマツに取って代わられた。アカエゾマツは、全体の造林量が減少したときに植栽のピークを迎えたこともあり大規模な被害は発生していない。拡大造林期に大発生したカラマツ、トドマツの病害は、幸いにして治まり、今ではカラマツ皆伐跡地にはカラマツが植えられることが多く、トドマツの造林面積も増加傾向にある。戦後70年をかけた壮大な野外実験がようやく一巡したといえる。

拡大造林が始まった頃、北海道では科学的知見が少なくスギを手本としてヘクタール当たり2500～3000本を植栽していた。林業が儲からなくなると長伐期を指向する風潮が広がった。そして今、主伐期を迎えた森林を研究材料として使える時代を迎えた。生産される材の質と施業方法の関係について科学的に検証できるようになり、少しずつ変化が起きている。カラマツ、グイマツ雑種 F_1 、トドマツを例にあげよう。

カラマツでは林齢10～15年で最初の除伐を迎え、15～20年で繊維が短く材の強度が低い未成熟材から繊維が長く材の強度が高い成熟材に移行する。間伐試験地の調査から間伐は、年輪幅が増加し材の強度が低下する弊害よりも、未成熟材に対する成熟材の比率を上げ、丸太全体の強度を高める効果大きいことが

明らかとなった(安久津ら2012)。間伐は材の量を確保するだけでなく材の質を高めることがデータをもって実証され、材の用途まで考慮した施業体系を検討できるようになった。

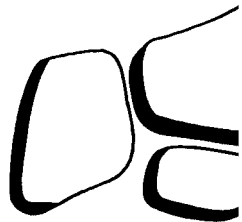
グイマツ雑種 F_1 はグイマツとカラマツの一代交雑種で、野鼠の食害を受けやすく幹が曲がる欠点を持つカラマツを改良するために開発された。従来の施業方法は、2000本/ha以上の木を植え、最終的な立木本数の300～500本まで除間伐を繰り返す。たくさんの木を植え除間伐を繰り返すのは形質の悪い木を取り除き最後に形質の良い木を残すためだ。しかし、グイマツ雑種 F_1 は幹が真っ直ぐで除間伐により形質不良木を取り除く必要性が格段に少ない(大島・錦織1994)。従来通りたくさんの木を植える必要がない。カラマツも元々、材の強度が高い樹種で建築用構造用材に用いられてきたがグイマツ雑種 F_1 はさらに材の強度が高い(根井ら2005、2006)。低密度植栽で年輪幅が増加しても強度不足になる心配は少ない。この結果を受け北海道庁は、植栽本数1500本/haを造林補助対象の下限値としていたが、グイマツ雑種 F_1 に限って1000本/haとした。やみくもに2500本以上植えていた時代から一歩前へ進んだ。

トドマツは、北海道で最も人工林面積が多い樹種だ。標準伐期齢は50年であったが、林齢80年程度の長伐期施業を想定されることも多かった。しかし、トドマツは高齢になると材の腐朽が起ると昔から心配され、現場の技術者からは、長伐期施業は山でトドマツを腐らしているようなものだとの声が上がっていた。トドマツ人工林224林分13,288本を対象とした調査から高齢になるほど根株腐朽の発生率、量が増加する実態が浮かび

上がり(道総研林業試験場2015)、長伐期施業の危険性が明らかとなった。この結果を受け、トドマツの標準伐期齢が40年に短縮された。ひたすら長伐期を指向する時代を知る者にとっては画期的な変化である。

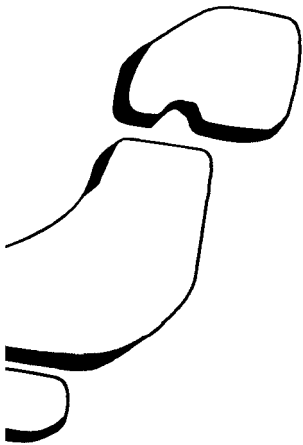
今、北海道では拡大造林期に植栽した

北から



九州で山といえば深い緑、スギやヒノキの人工林が目につく。今ではその資源構成と活発な林業・製材業のせいか、

カラマツ、トドマツ人工林の大量伐採期を迎えようとしている。しかし、それに続く若い林が少ない。戦後70年かけて行われた野外実験の成果を生かし、次世代の森をつくる時である。森林科学を志す若者よ、来たれ北の大地へ、未来の森のために解決すべき課題は多い。



南から

日本森林学会支部だより

目が飛び出るような数の木質バイオマス発電所が計画されている。一方、福岡県南部に広がる筑後平野には自然素材を原

料とする伝統的手工業が現在も多く残っている。ひょんなことから、そのうち2つの工場を見学する機会に恵まれた。

一つは、江戸時代末期に創業し150年も続く小さな天然樟脳工場。天然樟脳はクスノキを水蒸気蒸留して得られ、防虫剤や強心剤用カンフルとして古くから国際貿易の対象で、江戸時代にもオランダに輸出されていた。1860年代に樟脳を原料とするセルロイドが工業生産化され、需要増大により価格が高騰した結果、樟脳は専売品とされた。生産量は1891年にピークに達し、5年間で値段は二倍以上にもなったが、その後セルロイドはプラスチック類に取って代われ、先代のころは周辺に十軒ほどあった工場は1990年代後半には全国で唯一になっていたという。クスノキは江戸時代には多くの藩で禁伐対象の樹種であったが、明治新政府になり禁伐が解かれ樟脳需要の伸びとともに資源は枯渇していく。現在は、伐採を望む神社などから依頼されたり、原木市場で購入することで原木を確保しているそうだ。

もう一つは、ハゼの実から木蝨を精製する精蝨工場で、こちらも1850年創業と歴史が古く、現在は全国に3軒あるうちの1つとのこと。木蝨はハゼやウルシの実から抽出される蝨で、古くから和蝨燭や鬢付け油として利用され、江戸時代に工業化とともにハゼ栽培が進められるようになった。ハゼの実もまた産地では藩財政を支えるほどの換金作物で、戦前には国による増産政策がとられ、福岡県は昭和初期には収穫量全国一位になるほどの産地でJapan Waxの海外輸出拠点の一つでもあった。この頃にはポマードなどの整髪剤、クリーム、織物や木製品の艶出しなど用途は広がっていた。しかし、パラフィン蝨燭の普及など代用品に置き換えられ木蝨産業は衰退してい

た。訪問した工場も一時は製造を中止していたが、現在は関西の和蝨燭店、鬢付け油、化粧品原料としてヨーロッパなどに輸出している。原料であるハゼの実生産は農家の副業として支えられていたが、木蝨産業の衰退とともにハゼ畑は伐採され、残っていても高齢化により収穫が困難になっているという。使用しているハゼの種類は、昭和福櫨、伊吉櫨、葡萄櫨の3種類で、融点の高い葡萄櫨は和蝨燭の外側に使用するなど特徴によって使い分けられる。かつては農家の方がハゼの種類ごとに分類して納品していたが、最近では区別がつく方がいなくなり、工場で仕分けをしているようだ。自営農林家の方が農山村に住んでいることで継承されていた植物の知識と支えられていた文化がどんなにあることだろうか。

クスノキもハゼも温暖な地域が適地で、それゆえに九州に栄えた産業であった。産業として衰退し消え去ろうとしていた天然樟脳や木蝨は、健康にやさしい天然素材として見直されつつあり、現在、天然樟脳工場は九州に4軒に増加している。新たな需要も広がり、大手生活雑貨店でも取り扱いがあるほどだ。木蝨もパラフィン蝨燭にはない炎の揺らぎが評価されているという。

さて、九州では皆伐の動きが強まり、伐採後には再びスギやヒノキを植林している。木と人との関わりを歴史を考えれば、古くからの林業地を除いて針葉樹人工林とのつき合いはほんの一部。例えば50年後、100年後に、地域の記憶や自然との関わりを呼び起こさせるような森林配置や樹種も選択肢の一つではないだろうか。社会の中でひっそりと、しかし確かに多様な自然との関わりや営みが存在していることで、社会に文化の厚みが加えられるのだと思う。

楠と櫨

川崎 章恵 (かわさき あきえ、九州大学大学院農学研究院)

森林科学 75

予告

特集

流域と森林 (仮)

森林科学 75 は 2015 年 10 月発行予定です。ご期待ください。

お知らせ

- ・「森林科学」では読者の皆様からの「森林科学誌に関する」ご意見やご質問をお受けし、双方向情報交換を実践したいと考えております。手紙、fax、e-mailで編集主事までお寄せ下さい。
- ・日本森林学会サイト内の森林科学のページでは、創刊号からの目次がご覧いただけます。また、バックナンバー（完売の号あり）の購入申し込みもできます。
- ・56号以降については、森林学会会員の方は別途お送りするパスワードでオンライン版をご利用になれます。パスワードに関するお問い合わせは編集主事へどうぞ。

森林科学編集委員会

委員長	太田 祐子	(森林総研)
委員	加賀谷悦子*	(昆虫/森林総研)
	松浦 俊也*	(経営/森林総研)
	藤田 曜	(動物/自然環境研究セ)
	小川 泰浩	(防災/森林総研)
	江口 則和	(保護/愛知県森林・林業技術セ)
	山田 祐亮	(経営/日本森林技術協会)
	橋本 昌司	(土壌/森林総研)
	平野悠一郎	(林政/森林総研)
	磯田 圭哉	(育種/森林総研)
	田中 恵	(土壌・造林/東京農大)
	斎藤 仁志	(利用/信州大)
	田中 憲蔵	(造林/森林総研)
	宮本 敏澄	(北海道支部/北海道大)
	松木佐和子	(東北支部/岩手大)
	逢沢 峰昭	(関東支部/宇都宮大)
	松浦 崇遠	(中部支部/富山県森林研)
	長島 啓子	(関西支部/京都府立大)
	川崎 章恵	(九州支部/九州大)

(*は主事兼務)

編集後記

「機械はどうやったって、人間に勝てないんですよ」

私が学生時代に従事していた教授は、リモートセンシングの話になると、口癖のようにおっしゃっていました。コンピュータによる画像解析の技術がいくら進歩しようと、人間が事細かに見て分類した結果の精度には、到底敵わないというわけです。画像解析技術は、如何に人間の目を再現するかに心血を注いできたわけですから、人間に軍配が上がるのも道理かもしれません。

ところが、技術が進歩するにつれ、様相が変わってきました。リモートセンシング技術は、“人間の模倣”から“機械にしか出来ないこと”の領域へ発展をはじめています。本号の特集においてご紹介したレーザーや立体化といった技術は、コンピュータによる解析があって初めて成り立つ技術です。リモートセンシングは、機械にしか取得できない、これまでにない形態の情報を提供できるようになってきています。

より広域で正確な資源情報や、精緻な単木情報は、既存の計測方法では容易に取得できない情報です。このような情報は、ある意味大雑把な情報を元に行われてきたこれま

での森林経営・管理を、根底から覆す可能性を秘めています。例えば、広域な資源情報は地域レベルの森林管理計画に、精緻な単木情報は川下との需給マッチングに有効でしょう。木材生産に限らない様々な分野においても、新技術の応用が期待されています。

私達はこれから、新しい技術や情報を、実際の森林管理にどのように活用していくかを考えていかなければなりません。どんなに素晴らしい技術や情報でも、使いこなさなければ持ち腐れていくばかりです。今後のリモートセンシングと森林管理は、切っても切れない密接な関係を築いていくことでしょう。今回ご執筆いただいた方々は、現場の最前線で、普及・利用に向けて尽力していらっしゃいます。読者の皆様も、近い将来に森林管理へ組み込むことを前提として、本号の特集をお読みいただけると幸いです。

さて、森林科学では、特集の内容を随時募集しています。今後取り上げて欲しい内容が有りましたら、是非編集部までご連絡下さい。

(編集委員 山田祐亮)

「森林科学」への投稿について

「森林科学」投稿要領

(2015年3月26日改訂)

1. 投稿できるのは日本森林学会会員および「森林科学」購読者のみとする。ただし筆頭者以外の共同執筆者および依頼による記事の執筆者についてはこの限りではない。
2. 原稿は、解説、記録、研究トピックス、読者の声、その他とし、和文とする。
3. 原稿の採否は編集委員会が決定する。
4. 原稿の長さは原則として、すべてを含む刷り上がりが解説、記録は4頁以内、研究トピックス、読者の声、その他は2頁以内とする(1,500字/頁を目安とする)。
5. 投稿原稿は執筆要領にしたがって作成し、電子メールで提出する。
6. 著者校正は原則として初校に限り、誤植の訂正にとどめる。
7. 解説・記録・研究トピックスの著者は別刷50部を希望により無料で受け取ることができる。無料分以上(50部単位)およびpdf別刷りを希望する場合は、著者の負担とする。
8. 原稿の送付および編集についての問い合わせは森林科学編集主事あてとする。
9. 著者は最終原稿を提出する際に、著作権譲渡承諾書を提出しなければならない。

著作権規定

(2009年3月26日改定)

1. 本会の刊行物への掲載が受理された記事、論文等の著作権は、本会単独であるいは本会の定める出版社と共同で、本会に帰属するものとする。
2. 著者に許容される権利については、刊行物ごとに別に定める。

「森林科学」執筆要領

(2015年3月26日改訂)

1. 原稿の書き方

専門分野以外の読者が理解しやすいように、図表や写真を多くし、わかりやすく、簡潔な表現を用いる。図にできる場合はなるべく表を使わない。目安として、少なくとも1頁に1つの図や写真を入れるようにする。

2. 投稿原稿の種類

解説：特定の研究テーマや話題に関する解説

記録：シンポジウムや研究会の記録

研究トピックス：プロジェクトや国際共同研究、特徴ある研究の紹介

読者の声：読者の意見や主張

ブックス：書評、出版物の紹介

その他：上記以外の内容についての投稿。編集主事まで問い合わせること。

3. 原稿の形式

原稿の種類に合わせて、以下の内容をそれぞれページを分けて記載すること。

①投稿連絡票(表題、著者名、所属先、原稿種類名、連絡先(住所、電話番号、電子メールアドレス))、②本文、③引用文献(「解説」・「記録」・「研究トピックス」で必要な場合のみ。最大10点を目安に。)、④図表、⑤図表の説明、⑥紹介する印刷物の書誌情報(ブックスのみ。著者・出版社・出版年・頁数・価格・ISBN。)

4. 原稿の体裁

原稿は電子メールに添付しての提出を基本とする。ファイル形式などの詳細については編集委員会が定める「原稿執筆ガイドライン」を参照のこと。

図表の表題にはそれぞれ通し番号をつけ、1点ごとに別ファイルとする。各ファイルには筆頭著者名と通し番号を含む分かりやすい名前を付ける。

5. 引用文献

引用文献は必要最小限とする。本文中での引用は、①引用順に(1)、(2)、(3)のように上付きの通し番号を振る、②該当人名に(年号)あるいは事項に(人名 年)をつけて引用する。混用はしないこと。引用文献の記載は、①では通し番号順、②ではアルファベット順に行う。誌名の略記法は和文の場合は慣例により、欧文の場合はForestry Abstractsにならう。巻通しページがある場合は巻のみとし、ないときは巻(号)を併記する。

<引用文献記載例>

a. 雑誌の場合

笠井美青・丸谷知己(1994)山地河川における立木群による土砂の滞留機構. 日林誌 76: 560-568

Ochiai Y, Okuda S, Sato A (1994) The influence of canopy gap size in soil water conditions in a deciduous broad-leaved secondary forest in Japan[†]. J Jpn For Soc 76: 308-314

b. 書籍の場合

Levitt J (1972) Responses of plant to environmental stresses. Academic Press

渡邊定元(1994)樹木社会学. 東大出版会

c. 書籍中の場合

小林繁男(1993)熱帯土壌の瘦悪化。(熱帯林土壌・真下育久編, 勝美堂). 280-333

Wells JF, Lund HG (1991) Integrating timber information in the USDA Forest Service[†]. In: Proceedings of the Symposium on Integrated Forest Management Information Systems. Minowa M, Tsuyuki S (eds) Japan Society of Forest Planning Press, 102-111

[†] 紙幅が足りない場合は、タイトルの省略を認める。

原稿の送付および編集についての問い合わせ先は下記あてとする。

森林科学編集主事 加賀谷 悦子

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

森林総合研究所

企画部研究企画科

Tel 029-829-8114

e-mail eteshoda@fpri.affrc.go.jp

学会事務についての問い合わせ先

一般社団法人 日本森林学会

〒102-0085 東京都千代田区六番町7

日本森林技術協会館内

Tel/Fax 03-3261-2766

http://www.forestry.jp/

(日本森林学会)

http://www.forestry.jp/publish/ForSci/

(森林科学)

複写をされる方に：図 学協会著作権協議会へ複写権委託済み

許諾・連絡は、〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F 学協会著作権協議会 (Tel./Fax 03-3475-5618)



信頼と実績のKNインターナショナルの 英文校正サービスのご案内

KNインターナショナルは1995年会社設立以来、科学英語論文の校正で数多くの日本の研究者の方々の論文を欧米一流ジャーナルに掲載されるお手伝いをしてきました。

高品質で丁寧な校正、迅速な対応、リーズナブルで明快な価格設定のエディティングサービスで国公立大学、研究機関、病院で高く評価されています。論文をより高度な英文に仕上げ、論文へのアクセプト率を高める校正サービスを長年にわたって提供しております。

高品質・丁寧・迅速

科学技術分野に於いて経験及び知識豊富なネイティブのエディター（すべてアメリカ人）が皆様の論文を国内及び海外のジャーナルにアクセプトされるのをサポートいたします。高い教育（Ph.D.等）と経験（アメリカの科学ジャーナルの元スタッフ等）を積んだ英語のスペシャリストのエディターが基本的な文法やスペリングのチェックだけでなく、文章表現や全体の構成をより精度の高いものにするように、文章の書き換え、提案等をさせていただきます。

ジャーナルのインストラクションへの対応や校正証明書の発行、校正に対するご質問などのアフターフォローにも対応いたします。

信頼と実績

1995年以来、50,000以上の原稿の校正で、数多くの研究者・医師・エンジニアの方々のサポートをしてきました。89%以上のお客様は、当社のサービスをご信頼いただき、繰り返しご利用していただいております。

当社の校正によりジャーナルへのアクセプト率が高まったとの感謝のメールを多数いただいております。

リーズナブルで明快な価格設定

1ページ（200words） 1,700円（税抜）

*原稿内容や納期による追加・割増料金の請求はいたしません。

フレキシブルな納期

通常10-30ページ程度の場合で5-7日で校正をいたします。特にお急ぎの場合はご相談ください。ご指定の期日に間に合うようにスケジュールを調整いたします。

秘密保持

当社のエディターとは、契約時に原稿の一切の内容を外部に漏らさぬように契約を交わしておりますので、安心してご利用いただけます。

ご注文方法

原稿をWordファイルに添付していただき **order@kninter.com** までお送りください。ファイル上で校正したものをe-mailにて返送いたします。原稿依頼等のお問い合わせは、すべて日本語で対応いたします。

お支払い方法

お支払いは、公費、自費のいずれでも対応いたします。当社は数多くの大学、研究機関にて業者登録済みです。お支払の相談にも対応させていただきます。

KN INTERNATIONAL INC

KNインターナショナル 東京オフィス
東京都目黒区目黒本町4-16-7 SWビル
TEL : 03-5704-7887 FAX : 03-4496-4307

お問い合わせは info@kninter.com
ご注文は order@kninter.com
ホームページ: www.kninter.com