

(3) リモートセンシング法

次期枠組みでの森林吸収量の算定において、リモートセンシングを用いる方法について検討した。

従来の森林簿やNFIを用いた算定手法は林分調査を基礎とするが、これに替わる方法として、衛星データやデジタル空中写真、航空機 LiDAR(以下、LiDAR)などのリモートセンシングデータから林分レベルでのデータを取得し、吸排出量を算定する手法が考えられる。また、上空からの高精細センサによる観測に加え、Landsat 衛星などの中分解能衛星データとの組合せ(wall-to-wall)により、リモートセンシング技術だけを用いた方法が考えられる。このことはリモートセンシングに用いるデータの種別に関係していることから、以下中～高分解能衛星データ、デジタル空中写真、LiDAR データに分けて整理・検討し、更にデジタル空中写真と LiDAR データの組合せについて検討する。

(ア) 中～高分解能衛星データ

1) Landsat 衛星 8 号

中分解能衛星の特徴としては、1つの軌道(パス)で広域の空間情報が取得可能であること、また、これにより、回帰日数が短く観測頻度が高くなり、結果として、雲のないデータを得られる可能性が高くなることが挙げられる。中分解能衛星データで最も利用されているものが Landsat 衛星である。これまで運用されたシリーズ衛星であることから過去のデータ蓄積も豊富であり、比較可能性も高く様々な研究成果が蓄積されている。途上国における国や準国レベルでの森林分布図作成に広く活用されており、我が国全域を捉える目的としては非常に有効である。更に、撮像データが標準化され米国地質調査所 USGS (United States Geological Survey : <http://www.usgs.gov/>) から無料で提供されていることも有効性の一つと言えよう。

一方、我が国全域に対して衛星データを整備する場合に、雲の影響がない画像(以降、「雲なし画像」と呼称)をどの程度の期間で全域整備できるのか入手可能性を調査しておくことが必要である。そこで、現在運用されている Landsat 衛星 8 号(以下、Landsat8)を対象としたデータの雲なし画像の取得状況を整理した。

① Landsat8 の特徴

Landsat8 は 2013 年 2 月に打ち上げられて以降、16 日周期で同一箇所のデータを取得している。前述したように、シリーズ衛星であることから、Landsat1 が打ち上げられた 1972 年から 40 年以上のアーカイブが無料で提供されており、時点間の変化抽出を行うことが可能である。また Landsat4 以降の地上分解能が 30m(パンクロデータについては 15m、Landsat 7 以降搭載)であることから、単木単位の観測には適さないが、林分単位での観測を行うことができ、広域観測に適した衛星と言える。

② アーカイブデータ調査の手法

アーカイブデータを調査する際に、我が国の森林における季節性を考慮することが必要である。晩秋から春の期間には、落葉樹が葉を落とすため分類精度が低くなるという課題や、太陽高度が低いため斜面地形に影が多く出現し分類精度が低くなるという課題がある。このことからアーカイブの調査対象とする期間を平均的な着葉期とし、5月～10月までをその期間とした。落葉期が緯度や標高によって異なるため、北海道から九州まで同一の期間で調査するのは多少問題があるものの、我が国全体の傾向を知るという目的上、簡便な方法を用いた。

取得した衛星画像データの対象範囲は、日本全土をカバーする Path : 104～116、Row : 28～43 の全 69 シーンである。2014 年から 2015 年の 2 年間で、前述した着葉時期である 5 月～10 月の間に取得され、USGS 上で公開された 1,370 シーンが解析の対象である。

各シーンから国土交通省国土数値情報ダウンロードサービスより取得した H23 年の森林域データ (Shape ファイル) を利用して、Landsat 8 の画像から森林域のみを抽出した。更にその後、雲の影響が無い (雲がかかっていない) エリアを抽出した。雲を識別するために Landsat 8 から取得できるようになった Landsat Look "Quality" Image (ラスターデータ) を利用した。図 1-2-1(3)ア-1 は Quality Image のサンプルである。実際に解析に利用する部分は、赤い点線枠内である。白と黄色が雲を示し、画像上の黒色は雲の無いエリア若しくは No data を示している。

USGS によれば、No data の部分については Landsat Look Images を作成する過程で生じるとされており、No Data の領域中に実際の画像では雲が混じっている可能性もある。通常画像は撮影された対象により 1 から 255 の数値データと 0 とされる画像周囲の黒色部分に分けられている。No data 箇所が画像作成過程で 0 と定義された場合に、画像の圧縮アルゴリズムが No-data 部分をゼロの値をもった対象物と認識し、黒く表示させるために起こる現象である。

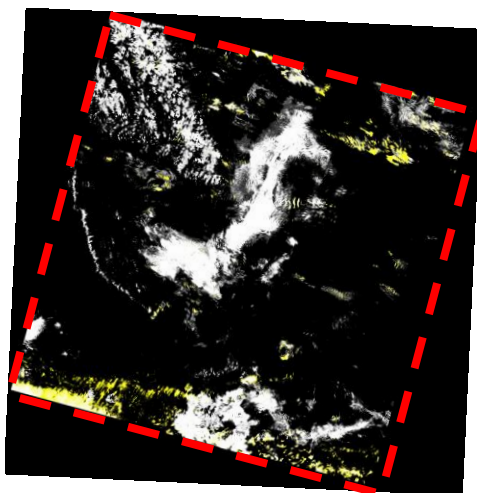


図 1-2-1(3)ア-1 LandsatLook "Quality" Image のサンプル画像

＊赤い点線枠内の黒色部分が No data 領域

以下に、雲なし画像の抽出作業手順を図 1-2-1(3)ア-2 に示す。

ステップ 1. 前処理では、USGS から取得した Landsat8 のデータ一式から、Quality Image (QI) (.png ファイル) を、①年ごと、②Path ごと、そして③撮影日毎の順で分類していく。分類完了後に、撮影日ごとに分けた QI ファイルを、Landsat 8 の Path ごとにモザイク処理と言われる衛星画像同士を結合させる処理を行う。このステップを経ることで、その後の作業を、画像 1 枚ごとに対して行うのではなく、撮影日が同じ Path 毎に行うことが出来るようになる。また QI から森林域における雲のあるエリアと無いエリアを分類し、最終的に雲の影響の無い画像を作成することを目指すことから、作業の効率化のために、1～255 に分類された属性を、雲あり (0) と雲なし (1) に分ける二値化を行う。また、他の画像と重ね合わせる為に、QI をベクターデータ形式に変換しておく。

ステップ 2. の森林エリアの抽出においては、ステップ 1 で作成した画像から森林エリアのみを抽出するための処理を行う。国土交通省が運営する国土数値情報ダウンロードサービスが公開している森林エリアのデータのうち最新である平成 23 年度の Shape ファイルを取得する。次に、森林エリアの雲なし画像がどの程度の確率で取得できるかを算出する為に、1km の格子状に区切ったデータと森林エリアのデータとを重ね合わせる。このことで、1km の格子単位で何%の雲の影響の無い画像を取得できるかを確認することが出来る。格子状に区切られた森林エリアとステップ 1 で作成したデータを重ね合わせることで、QI 画像から森林エリアのみを抜き出す作業を行う。ここで注意することは、Path ごとにデータを処理しているため、格子状に区切ったデータが、画像の端では格子が途中で切れたような形をしている点である。そこで 1km 四方の格子が 100ha であることを利用し、衛星画像の淵に沿って存在する 100ha 以下の面積を示す格子を削除した。こうして作成された画像の端を処理した森林エリアと、ステップ 1 で作成した Path ごとの画像を重ね合わせ、QI から森林エリアを抽出した。

ステップ 3. においては雲の影響があるエリアを除外し、最終目標である雲の影響の無い画像を抽出する。森林エリアのみを抽出した QI 画像から雲 (0) のある箇所を削除し、最終的に各 Path を年ごとに統合することで、雲の影響の無い画像を年ごとに取得することが出来る。

Landsat8 の雲なし画像の 1km メッシュにおける取得状況は表 1-2-1 (3) アのとおりである。2014 年及び 2015 年ともに森林面積に対して 90%以上の雲なし画像を取得することが出来た (巻末資料参照：雲なし画像図)。また 2 年間を 1 サイクルとして考えた場合、日本の森林エリアの約 99%をカバーする雲なし画像を取得することができた。

この約 90%のカバー率がアーカイブデータ調査を実施した 2 年間の間で偶然に取得できたものか、もしくは高い確率で雲なし画像を取得できる可能性があるか判断するために、雲なし画像取得率を求めた。取得率は年ごとに取得した画像数に対して、何枚の雲なし画像が 1km メッシュ単位で取得できたかをパーセンテージで示したものである。また 2 年を

1 サイクルとした場合、2 年間で撮影された画像の合計数に対する取得率を算出した。解析結果は巻末資料に図示したとおりである。なお図示した画像は後述する LiDAR 及びデジタル空中写真を森林管理署ごとに纏めたデータで示していることから、本図においても便宜的に各森林管理署の管轄地域に則して図示している。

取得率の結果を見ると、全国的に薄い黄緑から緑色を示しており、約 21～60%の範囲の取得率を示していることが見て取れる。局所的に見れば、濃い緑色を示し 61～80%の取得率がある地域も散見される。取得率が低い地域としては、中部地方を挙げることが出来る。これは、当該地域が山岳地形であるため、通年雲が多く、撮影が困難であることを示唆しているものと考えられる。単年度で見た場合、及び 2 年 1 サイクルで見た場合共に、20%以下の取得率を示した地域が北海道、東北、中部、九州地方に見られる。

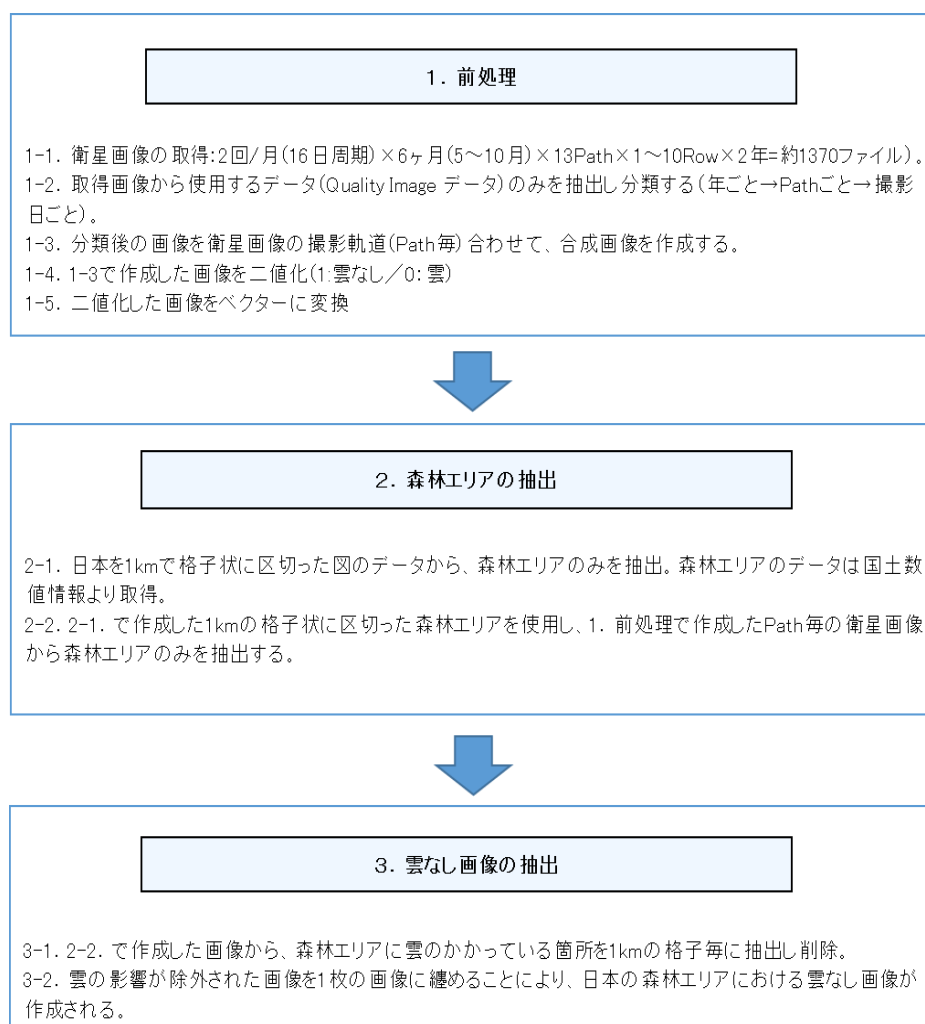


図 1-2-1(3)ア-2 雲なし画像の抽出作業手順

③ アーカイブデータ調査の結果

表 1-2-1(3)アー1 森林エリアにおける雲なし画像取得状況 (単位: km²)

No	森林管理所	都道府県	森林面積	2014		2015		2014+2015	
				面積	取得率(%)	面積	取得率(%)	面積	取得率(%)
1	北海道	北海道	56,000	46,400	82.9	55,500	99.1	55,787	99.6
		小計	56,000	46,400	82.9	55,500	99.1	55,787	99.6
2	東北	青森県	6,475	6,251	96.5	6,448	99.6	6,459	99.8
3		岩手県	9,514	9,174	96.4	9,407	98.9	9,458	99.4
4		宮城県	4,298	4,194	97.6	4,116	95.8	4,260	99.1
5		秋田県	8,520	8,416	98.8	8,476	99.5	8,490	99.7
6		山形県	6,728	6,612	98.3	6,641	98.7	6,699	99.6
		小計	35,535	34,646	97.5	35,088	98.7	35,367	99.5
7	関東	福島県	9,854	9,745	98.9	9,604	97.5	9,800	99.5
8		茨城県	1,980	1,898	95.9	1,883	95.1	1,945	98.2
9		栃木県	3,536	3,504	99.1	3,515	99.4	3,524	99.7
10		群馬県	4,392	4,238	96.5	4,093	93.2	4,321	98.4
11		埼玉県	1,244	1,211	97.3	1,056	84.8	1,222	98.2
12		千葉県	1,604	1,576	98.3	1,517	94.6	1,584	98.7
13		東京都	802	692	86.2	735	91.7	764	95.3
14		神奈川県	925	916	99.1	903	97.7	918	99.3
15		新潟県	8,673	8,188	94.4	8,469	97.6	8,592	99.1
16		静岡県	5,017	4,939	98.5	3,596	71.7	4,951	98.7
		小計	38,026	36,909	97.1	35,372	93.0	37,622	98.9
17	中部	富山県	2,887	2,330	80.7	2,683	92.9	2,719	94.2
18		長野県	10,300	9,830	95.4	9,965	96.8	10,139	98.4
19		岐阜県	8,565	7,892	92.1	8,381	97.8	8,478	99.0
20		愛知県	2,198	2,152	97.9	2,079	94.6	2,161	98.3
		小計	23,950	22,203	92.7	23,108	96.5	23,496	98.1
21	近畿中国	石川県	2,914	2,760	94.7	2,899	99.5	2,902	99.6
22		福井県	3,169	2,895	91.3	3,117	98.3	3,142	99.1
23		山梨県	3,491	3,425	98.1	2,716	77.8	3,452	98.9
24		三重県	3,790	3,695	97.5	3,643	96.1	3,751	99.0
25		滋賀県	2,057	2,016	98.0	1,977	96.1	2,039	99.1
26		京都府	3,312	2,060	62.2	3,263	98.5	3,278	99.0
27		大阪府	576	498	86.4	556	96.4	566	98.2
28		兵庫県	5,663	4,998	88.2	5,499	97.1	5,542	97.9
29		奈良県	2,820	2,807	99.5	2,806	99.5	2,818	99.9
30		和歌山	3,639	3,584	98.5	3,615	99.4	3,623	99.6
31		鳥取県	2,577	2,530	98.2	2,542	98.6	2,554	99.1
32		島根県	5,293	5,258	99.3	5,232	98.9	5,265	99.5
33		岡山県	4,935	4,871	98.7	4,881	98.9	4,906	99.4
34		広島県	6,378	6,298	98.7	6,289	98.6	6,327	99.2
35		山口県	4,481	4,443	99.1	4,445	99.2	4,460	99.5
		小計	55,095	52,136	94.6	53,479	97.1	54,626	99.1
36	四国	徳島県	3,232	3,185	98.6	3,186	98.6	3,200	99.0
37		香川県	1,018	982	96.5	993	97.5	1,003	98.4
38		愛媛県	4,127	4,074	98.7	4,044	98.0	4,074	98.7
39		高知県	6,011	5,971	99.3	5,984	99.6	5,993	99.7
		小計	14,388	14,213	98.8	14,208	98.7	14,270	99.2
40	九州	福岡県	2,274	2,048	90.1	2,221	97.7	2,241	98.6
41		佐賀県	1,183	815	68.9	1,102	93.1	1,112	94.0
42		長崎県	2,669	2,243	84.1	2,524	94.6	2,563	96.0
43		熊本県	4,922	4,299	87.3	4,832	98.2	4,861	98.8
44		大分県	4,613	4,474	97.0	4,525	98.1	4,557	98.8
45		宮崎県	6,035	5,710	94.6	5,840	96.8	5,865	97.2
46		鹿児島	6,282	5,155	82.1	5,786	92.1	5,927	94.3
47		沖縄県	1,131	780	69.0	734	64.9	938	83.0
		小計	29,108	25,525	87.7	27,565	94.7	28,064	96.4
合計			252,103	232,032	92.0	244,319	96.9	249,231	98.9

* 森林面積は、国交省の国土数値情報ダウンロードサービスから取得した H23 の森林エリアのデータを基に算出した。

2) SPOT 衛星

SPOT データは Landsat 衛星同様、過去からのシリーズ衛星として運用されているが地上分解能は高精細化し続けており、現在、SPOT 衛星 6 号、7 号では 1.5m の地上分解能のデータが取得されている。

本節で SPOT 衛星に特化して整理した理由は、すでに林野庁で収集された実績があること、更に今後も予算等に大きな変更が無い限り、データを収集していくことが見込まれるためである。つまり、今後もこのデータを広く森林分野に活用することができると解釈されることから、整備状況や利用可能性について整理する。

SPOT 衛星データは林野庁治山課で行われている保安林管理業務で調達されている。この業務は京都議定書における森林経営対象森林を明らかにする目的ではじめられたものである。我が国の京都議定書報告では保安林に指定されている森林が適切に管理されている限り、その林分における吸収量を 3 条 4 項のもとで計上することとしている。この際に、森林が適切に管理されている状態にあることを示す必要があり、法令に基づく措置が適切に運用されていることを以てこの条件を満たすこととしている。このことを明らかにするために、衛星データを用いた監視活動を行い、違法に伐採されたような林分が無いかどうかなどを確認する活動を開始した。SPOT 衛星はこの確認のために調達されたものである。

以下、これまでに取得・整備されたデータを整理し、その利用可能性を述べる。

① アーカイブデータの整理

前述した通り、SPOT 衛星画像は 2005 年から林野庁治山課の保安林管理業務で調達が開始された。2 年間を 1 サイクルとし、前半年である奇数年に 19 道県分、後半年である偶数年に 28 都道府県分の SPOT 画像を調達している（表 1-2-1(3) アー2）。2005-2010 年までは奇数年を整備基準年として定めとし、前半年、後半年共に取得年の画像を整備してきた。2011 年以降は、2 年間隔を 1 サイクルとすることに変更はないが、取得年は各年の画像を調達している。なお、2014 年までは SPOT5 のモノクロ画像（2.5m 分解能、オルソ画像）を取得しているが、2015 年以降は SPOT6/7 のカラー画像（1.5m 分解能、オルソ画像）の取得を開始した。

表 1-2-1(3) アー2 SPOT 画像取得状況

画像撮影年	サイクル	収集整備する画像データ	画像の整備年
2005 年	1 巡目	【SPOT5】 モノクロ 2.5m オルソ処理画像	【2005-2010】 奇数年を基準年として、前半・後半に分けて隔年で画像を整備 前半 19 県（奇数年） 後半 28 県（偶数年） 【2011～】 各年次の画像を取得。 前半 19 県：奇数年(2011、2013...) 後半 28 県：偶数年(2012、2014...)
2007 年	2 巡目		
2009 年	3 巡目		
2011 年	4 巡目		
2013 年	5 巡目		
2015 年	6 巡目	【SPOT6/7】 カラー 1.5m オルソ処理画像	

② SPOT 衛星データの利用可能性

SPOT 衛星データは、2 年間で日本全国をカバーする画像を得ることができ、平成 27 年度現在で既に 6 巡目に入ったことでデータの蓄積があり、予算の変更が無い限り今後もデータが蓄積されていく予定である。また、Landsat 8 に比べ高い分解能 (1.5m) を備えており、森林の地上部バイオマス推計の精度向上に貢献するものと考えられる。以上のことから、SPOT 衛星データは森林インベントリにおいて利用の可能性が高いと言える。

3) 高分解能衛星データによる森林資源把握の研究レビュー

中分解能衛星データは地上分解能が 30m であることから、樹木群を 1 つのピクセルで観測することになる。このため、林分を単位とした空間的な広がりをつめるのに適している (Tanaka et al, 2015)。一方で、森林の変化を抽出するには、9 ピクセル (0.8ha) 以上の変化面積が必要であり (栗屋, 1990)、小面積皆伐をつめるのは困難である。

高分解能衛星データの最も大きな特徴は、当然のことながらその地上分解能の高さにある。この高い地上分解能により単木の樹冠が観測可能となり、その集合体として林分をつめることが出来るようになった。このため高分解能衛星を用いた単木および林分の観測では、従来とは異なる手法が必要となる。そこでここでは高分解能衛星データから単木情報を抽出するために用いられる主な手法、および、高い地上分解能という特徴を活かした林相区分の手法について述べる。

① 単木情報の抽出

高分解能衛星データでは林冠層をしめる各立木の樹冠を識別できる。このため立木の梢端を抽出することで単木の位置を同定することが可能であり (Wulder et al., 2002)、これから立木本数を推定することが出来る。また、各樹冠の領域を抽出することが可能である (Culvenor, 2003) ことから、単木毎の樹種分類が試みられている。

☒ 梢端の抽出

立木の梢端抽出には局所最大値フィルターが用いられる。その際、抽出の精度はフィルターのサイズに大きく依存する (Wulder et al., 2002)。抽出に最適なフィルターサイズは、データの地上分解能とともに樹種や林齢、立木密度により異なる。若齢林分においては、どのようなフィルターサイズを用いても立木本数の推定が過小になる。一方、立木密度が 1000~1500 本/ha 以下の壮齢林分では、比較的精度よく立木本数の推定が可能である (Pitkänen, 2001 ; 古家・平田, 2002 ; Hirata et al., 2004)。樹種の違いについてみると、スギ及びヒノキの林分では、5×5 ピクセルの局所最大値フィルターにより 1 つの樹冠にほぼ 1 つの局所最大箇所が抽出されるのに対し、モミやケヤキでは複数の局所最大箇所が抽出されてしまう (古家ら, 2006)。

☒ 樹冠抽出と樹冠面積

単木樹冠の領域分割には、Watershed 法 (Wang et al., 2004) や Valley-following 法 (Leckie et al., 2003, 2004 ; Gougeon and Leckie, 2006) などがある。いずれの方法も梢端部で反射が強く樹冠の周辺部で影の影響のため反射が弱くなる特徴を用いている。樹冠領域の抽出においては、ギャップなど樹冠ではない領域を予め特定して、閾値を設定することにより解析から除外して処理を行う必要がある。このようにして樹冠として分割された領域の面積は樹冠面積を表すことになる。このようにして得られた樹冠面積を用いて、相対成長関係 (allometry) から立木の DBH や樹高、材積といった他の因子を推定する手法が開発されている (Hirata, 2008)。

☑ 単木の樹種分類

可視近赤外から短波長赤外域のリモートセンシングにおいては、反射スペクトルの特徴から地上構造物の識別が試みられる (資源・環境観測解析センター, 1996)。森林においては樹種ごとに異なる反射スペクトル特性を示し、この違いを利用して樹種分類が行われる。

Katoh (2004) は、北海道岩見沢市及び栗沢町の森林を対象に最尤法を用いて樹種分類を行った結果、針葉樹の分類精度は 70% 以上であったが、広葉樹の分類精度は 27 から 50% と低く、総合精度は 55% であったと報告している。Gougeon and Leckie (2006) は、Valley-following 法で単木樹冠の領域分割を行った後、樹冠ベースでの各樹種の特徴量を求めて樹種分類を行った結果、総合精度が 67% であったと報告している。反射スペクトル特性を利用した分類としては、全体の分類を行うのではなく、後方伝達ニューラルネットワーク判別法によりある特定の侵入樹種を抽出することも試みられている (Fuller, 2005)。

高分解能衛星データでは、樹冠サイズよりもピクセルが小さいことが多く、単木の樹冠を捉えることが可能であるが、一方で、樹冠の太陽光の当たっている面と日陰となる面で反射が異なり、また、ギャップが陰として識別されたりするため、単木レベルでの樹種分類では、樹冠表面の反射の違いやギャップの取り扱いに注意が必要である。

② 林相区分

森林を管理する場合、林分を単位とした情報が求められる場合が多い。高分解能衛星データでは、林冠からの反射スペクトル特性に加え、林分を構成する立木の樹冠及びその陰影により作り出されるテクスチャ情報を利用することが可能であり、これにより精度よく林相区分を行うことが期待されている。

☑ テクスチャ解析

高分解能衛星データにおいて、樹種や立木密度の違いはテクスチャの違いとして表れる (松英, 2004)。画像テクスチャは画像縮尺と対象物の規模との関係から相対的に構成されるため、同一対象地域においてもテクスチャが地上分解能の異なるデータでは違ってくる (資源・環境観測解析センター, 1996)。高分解能衛星データにおける森林域でのテクスチャは主に各樹冠の陰影により形成される。陰影は樹冠形によりその濃度が異なる。この特徴を用いて、陰影の濃度のヒストグラムから土地被覆を判別することが可能である (Asner and Warner, 2003)。また、この陰影の情報を用いて、樹冠サイズや DBH を推定する手法

が開発されている (Song and Woodcock, 2003 ; Greenberg et al., 2005)。樹冠サイズ, 樹高, 立木密度は, ピクセル間距離に対する非類似度を推定する空間統計モデル (Semivariogram) を用いても推定することが可能であり (St-Onge and Cavayas, 1995), この情報を用いて林相区分する手法が提案されている (St-Onge and Cavayas, 1997)。さらに, 同時生起行列から算出される分散, コントラスト, 相関, 均質性, 異質性といった特徴量 (高木・下田, 1991) を用いて林齢や樹高, 立木密度, 樹幹周囲長, 断面積合計 (St-Onge and Cavayas, 1995 ; Franklin et al., 2001 ; Kayitakire et al., 2006) といった因子を推定することが可能である。

☑ 反射スペクトル特性による樹種区分

林分という単位を捉えるのにテクスチャ情報は有用であるが, 林分を構成する主要樹種を判定するためには, 林冠からの反射スペクトル特性は欠かせない情報である。

Carleer and Wolff (2004) は, ブリュッセル郊外の森林を対象に最尤法を用いて樹種分類を行い, 総合精度で 86% という良好な分類結果を得ている。河邑ら (2005) は, 岐阜県大和町及び美並村を対象に決定木法を用いて樹種分類を行い, 総合精度で 67% の分類結果を得ている。この分類において, 群落面積の大きな樹種については的確な判別が行われ, 小規模な面積の群落の樹種についても竹林, カラマツの抽出精度は高かったが, 他の樹種の混交がみられたナラ類, アカマツ, マツ枯れ箇所の分類精度は 50% 前後で総合精度を低下させる原因となっていた。また, 最尤法分類と決定木法を用いた分類とを比較した結果, 決定木法を用いた分類の方が良好な結果が得られている。

林野庁は平成 14 年から 5 年間森林資源モニタリング調査データ地理解析事業 (リモートセンシング資源解析事業) (平成 16 年から森林資源調査データ解析事業と改称) を実施している。本事業では高分解能衛星データと森林資源モニタリング調査データとを組み合わせた森林動態の把握・解析手法の開発を目的として, 樹種ごとの反射スペクトル特性を利用した樹種分類に関する検討が行われている (林野庁, 2003, 2004, 2005, 2006)。この樹種分類においては樹形図を用い, まず植生・非植生をバンド間の比演算を用いて区分し, 次に植生を立木・無立木地, 立木地を針葉樹林・広葉樹林と区分し, 最後に針葉樹林・広葉樹林をそれぞれの樹種に区分するフローを用いている。本解析では, バンド 3 (赤) とバンド 4 (赤外) との比演算である正規化植生指数 (NDVI) だけでなく, バンド 1 (青) とバンド 4 (赤外) との比演算も利用している。

☑ オブジェクト指向型分類

高分解能衛星データでは, 単木レベルでの観測が可能であり, これまでの中分解能衛星データではミクセル (混合画素) になっていた林分の境界が正確に捉えられる。その一方で, これまで均一とみなしていた空間に不均一性が生じるようになってきている。林冠のギャップや太陽光の当たり方の違いにより, 同一樹種の林分においても異なる輝度値を示し, 従来のピクセルベースの分類に影響を及ぼす。このため近年では, ランドスケープ構造を捉えるため, ある程度まとまりを持ったピクセルの集合 (オブジェクト) を画像分類

の単位とするオブジェクト指向型分類が用いられるようになってきている（村上，2004）。とりわけ，オブジェクト指向型分類において最初のステップである対象領域のセグメント化が容易な **eCognition** (DEFINIES Imaging, Germany) というソフトウェアの登場により，人間が判読するのと類似したセグメントを生成することが可能となった。**eCognition** は，セグメントを決定するパラメータが，空間スケールやオブジェクトのサイズに直感的にリンクしていない（Hay et al., 2005）という欠点はあるものの，隣接する画素間の異質性の高低により，それらを統合するか分割するかを決める機能を有しており，これまで森林を把握するための一般的な手法であった空中写真判読による「林相区画単位」での把握手法に最も近く，現在整備が進む森林 GIS との親和性も高い（林野庁，2005）。

大西ら（2004）は，従来のピクセルベースの分類とオブジェクト指向型の分類を比較して，林相区分においてオブジェクト指向型分類の方が分類精度が高いことを示している。また，中分解能衛星データでは捉えることのできない詳細な林相区分を，高分解能衛星では区分可能である（Ivits et al., 2005）。Gougeon（1995）と Leckie et al.（2003）は，単木樹冠をオブジェクトとして抽出し，これらのオブジェクト単位でのスペクトルに関する特徴量から，単木レベルでの樹種分類を行っている。Johansen et al.（2007）は，溪畔林とその周辺の森林生態系の構造を捉えるためオブジェクト指向型分類を行い，総合精度で 79% の分類結果を得ている。栗屋ら（2007）は，セグメントは不定形画素と見なせ，ミクセルが生じにくい利点があり，高分解能衛星データの場合，セグメントのサイズは樹冠程度にとどめた方が分類精度を高められる可能性が高いとしている。また分類結果に単画素によるノイズが発生しないこともセグメント化の利点であると述べている。

このオブジェクト指向型分類を用いた林相区分の実用化に向けて，国内では前述の「森林資源調査データ解析事業」において，いろいろな地方における林相区分のためのセグメントに用いるパラメータの検討が行われてきた（林野庁，2003, 2004, 2005, 2006）。オブジェクト分類では，テクスチャに関する特徴量も利用するため，テクスチャ解析の場合と同様に，同一対象地域においても地上分解能が異なるデータでは用いるべき特徴量が異なる（大西ら，2005）。また，ランドスケープレベルでの分類で，オブジェクトを捉えるスケールが違くと分類結果が大きく異なる可能性がある（Hall et al., 2004）ことに留意する必要がある。

4) 衛星データを用いた地上部バイオマスの推定について議論

Landsat 8 の画像のアーカイブ調査においては，雲の影響が無い画像が取得できる範囲が日本の森林地域に対して 2 年間 1 サイクルとした場合に約 99% をカバーする結果となった一方で，場所によっては雲なし画像の取得率が 20% 以下の場所もあり，Landsat 8 の画像のみを利用した場合，雲なし画像を取得できない場所も出てくる可能性がある。そのため，雲なし画像を取得できていない箇所を中心に SPOT の画像で補完することが考えられる。

地上部バイオマスを推定する上で重要となるこの 1 つが，どの程度の精度で解析を

行えるかである。その点において、Landsat8 の 30m（パナマチックは 15m）よりも地上分解能が 1.5～2.5m と高い SPOT を利用することが有効であると考えられる。

なお、地上部バイオマの推定精度をより向上させるためには、デジタル空中写真や LiDAR といった他のリモートセンシング技術の利用も検討する必要がある。これらについては以下に後述する。

(イ) デジタル空中写真

デジタル空中写真はアナログ空中写真に比べ、地上分解能が向上していることやデジタル処理による解析技術により、多くの情報が抽出可能になったことなどの利点が挙げられる。空中写真撮影は森林計画の編成時点で実施され、現況を把握することを目的としているため、制度的には 5 年に 1 回は再撮影される。この仕組みは国有林・民有林同様であるものの、特に民有林においては空中写真撮影費用が地方への一括交付金に含まれるようになったことから、5 年間隔で全国の森林を空中写真で網羅することは難しくなってきた。

次期枠組みにおける吸収量の算定を検討する場合、実際にどの程度の面積が撮影・整備されているか明らかにする必要があり、以下整理し、その活用方法を検討した。

1) デジタル空中写真の撮影状況

デジタル空中写真の撮影状況は、表 1-2-1 (3) イ の通りである。データは一般社団法人日本林野測量協会 (<http://rinsokyo.sakura.ne.jp/>) が公開している平成 21 年から平成 26 年の 6 年間分の撮影記録をもとに本報告書用に加工したものである。1-2-1 (3) イ から明らかのように、全国の森林面積に対して 5 年間での撮影面積 50% 余りであり、現在の状況のまま次期枠組みにおける吸収量算定に利用するのは難しい。ただその一方で、高精細な空間情報を取得可能であり、地上調査が困難な地点での情報や境界情報を抽出することが可能であることから、他の方法との組合せ、あるいは補助情報として活用できる可能性がある。

表 1-2-1 (3)イ デジタル空中写真取得状況

森林管理局	森林面積	区分	平成21年度		平成22年度		平成23年度		平成24年度		平成25年度		平成26年度	
			面積	撮影率 (%)	面積	撮影率 (%)	面積	撮影率 (%)	面積	撮影率 (%)	面積	撮影率 (%)	面積	撮影率 (%)
北海道	55,425	国有林	4,343	8	4,921	9	6,668	12	10,617	19	4,055	7	4,343	8
		民有林	3,715	7	3,420	6	3,236	6	0	0	1,320	2	2,290	4
東北	37,333	国有林	3,772	10	2,380	6	5,279	14	2,023	5	3,682	10	3,405	9
		民有林	—	—	585	2	—	—	—	—	—	—	—	—
関東	37,502	国有林	1,438	4	409	1	1,636	4	1,114	3	1,237	3	1,335	4
		民有林	3,062	8	979	2	1,083	3	943	2	813	2	1,365	3
中部	24,343	国有林	2,637	11	3,569	15	539	2	0	0	487	2	2,637	11
		民有林	3,946	16	3,419	14	3,250	13	3,552	15	2,140	9	4,853	20
近畿中国	54,502	国有林	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		民有林	837	2	1,061	2	733	1	1,959	4	513	1	847	2
四国	13,993	国有林	—	—	1,965	14	807	6	940	7	—	—	—	—
		民有林	—	—	—	—	—	—	—	—	1,877	13	—	—
九州	27,715	国有林	505	2	—	—	2,400	9	—	—	1,556	6	505	2
		民有林	5,043	18	3,518	13	3,479	13	4,428	16	3,271	12	4,631	17
全国の国有林・民有林別 撮影面積		国有林	12,695	5	13,244	5	17,329	7	14,694	6	11,017	4	12,225	5
		民有林	16,603	7	12,982	5	11,781	5	10,882	4	9,934	4	13,986	6
全国の 森林面積 合計	250,814		29,298	12	26,226	10	29,110	12	25,576	10	20,951	8	26,211	10

この表は一般社団法人日本林野測量協会 (<http://rinsokyo.sakura.ne.jp/>) よりデータを入手し、本報告書用に撮影記録を加工したものである。
 表中の森林面積は“km²”で示しており、表中の“-”は、デジタル空中写真の撮影が実施されなかったことを示す。なお、表中の各都道府県の森林面積は林野庁ホームページ(<http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h24/1.htm>) から、最新のデータである平成 24 年度 3 月 31 日現在のものを採用している。

2) デジタル空中写真を活用した情報抽出の技術

デジタル空中写真を用いた森林資源把握技術について、平成 22～24 年度に掛けて実施された「デジタル森林空間情報利用技術開発事業」(林野庁補助事業)(以下「デジタル森林事業」)の成果をもとに述べる。なお、デジタル森林事業の成果については、以下の URL から閲覧可能である。

http://www.jafta.or.jp/contents/publish/6_list_detail.html

ステレオペアの空中写真を立体視することにより、画像上で見えている地物の三次元的な位置情報を得ることができる。すなわち、樹木の梢端とその根元付近の地表面の高さをそれぞれ計測し、その差分を求め、それを樹高とみなすことが可能である。

このため、反射式実体鏡を用いアナログ空中写真の判読においては、梢端とその根元付近の地表面が視認できなければ樹高を判読することができなかった。一方、デジタル森林事業で開発したプログラム(以下「解析プログラム」という)では、デジタル空中写真を立体視し、樹冠が鬱閉し地表面が視認できない場合においても、地盤高データを読み込み、判読した梢端と地盤高データの差分を樹高とすることができる。

また、解析プログラムでは、立体視画面上に 0.1ha の方形区を示し、方形区内の樹木の梢端をカウントすることにより、ha 当たりの立木本数を求めることが可能である。

解析プログラム上では、デジタル空中写真から取得した樹高と本数のデータをもとに、林分密度管理図のパラメータを当てはめることにより蓄積の推定を行っている。デジタル森林事業の結果を一部ここに転載する。

全国で撮影したデジタル空中写真の撮影範囲で行った現地調査箇所(人工林 18 地点、天然林 17 地点)について立体視判読と現地調査結果の比較を行った。現地調査では胸高直径 1cm 以上の立木を計測対象としているが、空中写真の立体視では上層木のみが判読可能なため、ここでは樹高 10m 以上の立木のみを集計対象とした。樹高は、国土地理院の標高データと判読した梢端の標高差とした。

本数密度及び平均樹高の判読結果と現地調査結果の比較を図 1-2-1(3)イ-1、図 1-2-1(3)イ-2 に示す。本数密度は、天然林の場合に立体視判読が過小傾向となっている。天然林は林分構造が複雑で、現地調査結果で樹高 10m 以上の立木とした場合でも空中写真からは確認できない立木があるためと考えられる。

樹高はばらつきがあるが、立体視判読の精度のほか、標高データの誤差も含んでいるものと考えられる。

判読による蓄積の推定結果と現地調査結果の比較を図 1-2-1(3)イ-3 に示す。天然林の判読による蓄積が過小傾向を強く示している。

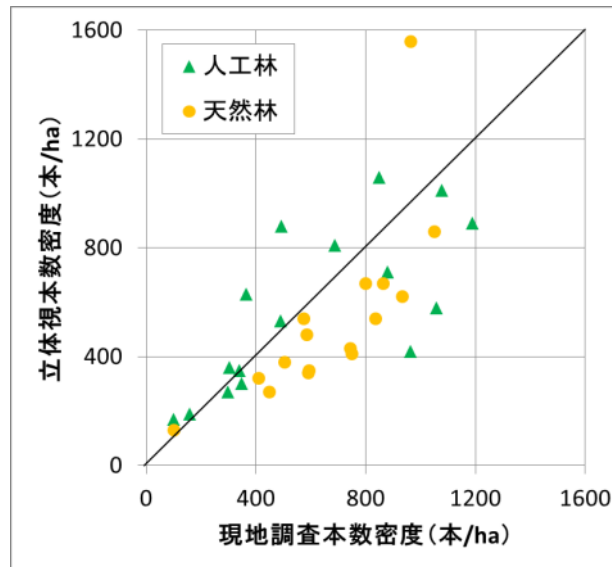


図 1-2-1(3)イ-1 本数密度の立体視判読と現地調査の比較

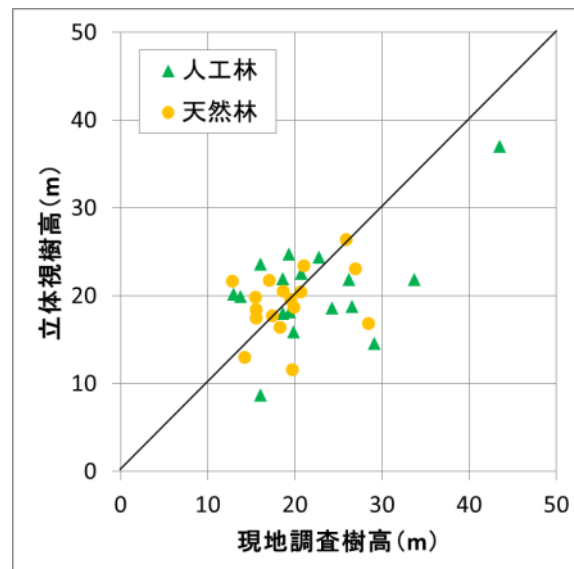


図 1-2-1(3)イ-2 樹高の立体視判読と現地調査の比較

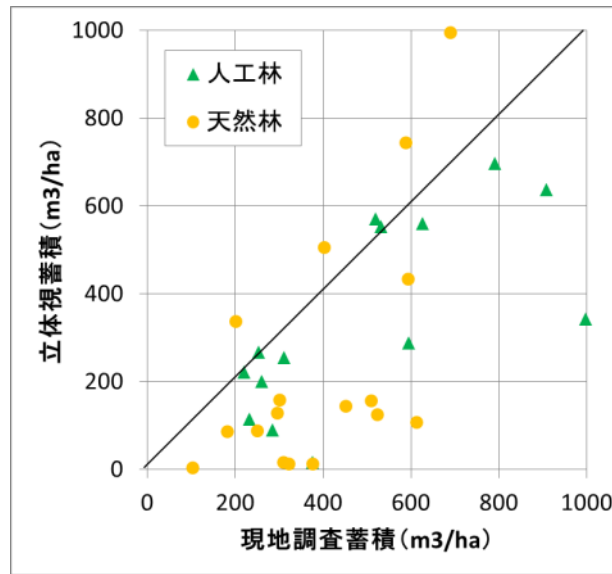


図 1-2-1(3)イ-3 本数密度の立体視判読と現地調査の比較

ここで、

| 立体視－現地調査 | / 現地調査の百分率＝誤差率（％）

とすると、人工林、天然林とも 30%程度、樹高は人工林の方の誤差率が 10%程度低く 26.7%、天然林が 35.4%となっている。蓄積の誤差率は高く、人工林で約 40%、天然林で 70%に達する。ここでは、地表高データに国土地理院の 10m 標高データを用いており、レーザ計測による標高データを使用した場合には、誤差が小さくなることが確認されており、推定精度は標高データの精度に依存する（九州地方のスギ現地調査箇所 23 箇所における検証で材積平均誤差率 21.0%）。

なお、天然林の蓄積誤差率が高いことは、広葉樹の林分密度管理図の精度の影響を受けていると考えられる。

3) デジタル空中写真を用いた地上部バイオマスの推定方法に関する議論

デジタル空中写真と高分解能衛星画像の最も大きな違いは、林冠表面の高さに関する情報の取得にある。ステレオ撮影により取得された写真は、オルソ画像を作成することが可能であるだけでなく、オルソ画像を作成するために必要となる数値表層モデル（DSM：Digital Surface Model）を自動的に生成することができる。この情報をいかに活用するかが、デジタル空中写真によるバイオマスの推定精度の向上に大きく影響する。

デジタル空中写真では、林分バイオマスに大きく影響する大径木の樹冠を、オルソ写真を用いて抽出するより正確に抽出することが可能となり、高分解能衛星画像でのバイオマス推定手法と同様に、樹冠サイズと胸高直径の相対成長（アロメトリー）式から単木のバイオマスを推定し、それらを足し上げて林分バイオマスを推定することが可能である。ただし、被圧木が上空から観測できないことや、地上解像度によって抽出可能な樹冠サイズ

が限定される問題はリモートセンシングデータに共通の問題である。

さらに、地形が平坦であったり、斜面傾斜が一定であったりした場合、ギャップなどで地面が観測可能な箇所では、観測された地面の標高から数値地形モデル（DTM : Digital Terrain Model）を作成し、先に述べた DSM と DTM との差分から林冠高モデル（CHM : Canopy Height Model）を算出することで、林冠と地面で作る空間の体積をもとめ、この体積から森林のバイオマスを推定する手法が考えられる。この手法は LiDAR で考えられている手法のデジタル空中写真への応用である。

しかしながら、我が国の森林の多くは地形の複雑な山地に生育しているため、平坦な地形や一様な斜面である場合が少なく、正確な DTM を作成することが難しい。そのため、デジタル空中写真から DSM が生成されても、それに対応した正確な DTM がなければ、高精度に地上バイオマスの推定を行うことが出来ない。これに対して、小班の中の地面が撮影されている箇所付近の樹木をサンプル木として単木の樹高を空中写真測量により求める方法の適用も考えられ、これまでいろいろな樹高計測のソフトウェアが開発されてきている。この場合、樹高計測作業時間を考えると、wall-to-wall での計測は現実的ではなく、サンプリングによって地上部バイオマスを推定する手法を開発する必要がある。

また、デジタル空中写真の場合、撮影高度によっては非常に高い地上解像度のデータを撮影することが可能である。このことは精度の向上につながる可能性が高いが、一方で、データ量の増大による作業量の増加、樹冠の影など細かなノイズの影響の除去、撮影時のカメラと樹木の位置関係による倒れ込みの処理などが問題となることを考慮し、適切な手法開発が必要となる。

地上部バイオマスを wall-to-wall で計測するか、サンプリング手法により推定するかにかかわらず、現在の森林に対するデジタル空中写真の整備状況は、次期枠組みにおいてデジタル空中写真による手法を導入する大きな障壁となる。従来 5 年に 1 度撮影されてきた空中写真は、空間的に森林の状況を正確に過去に遡れる唯一の手段であり、国土の保全のために不可欠なデータである。国の重要なデータであるということを再度確認し、データ整備に向けた環境作りが必要であると考え

（ウ） LiDAR データ

LiDAR データは上記で整理した光学系データと異なり、地形データ等を点データとして提供するものである。長所としては単木もしくは林分樹高、林分構造など垂直情報が得られることが挙げられるが、森林タイプの分類は光学系データよりも劣る。特に垂直情報については高い精度で単木樹高や林分高を得ることができるため、地上調査による地上部バイオマスデータの取得に代わるものとして注目される。

1) LiDAR データの取得状況

LiDAR の撮影記録は、国土交通省国土地理院から取得したものであり、データは国土地

理院もしくは国土交通省の地方整備局が整備したものである。50cm、1m、2m 及び 5m のグリッドデータに分かれており、格子点ごとに標高などのデータが格納されている。なお、今回取得した撮影面積に関する情報は、各グリッド間隔をメッシュに置き換えて計算されたものである。当然のことながら LiDAR データは格子点ごとのデータであり、光学リモートセンシングデータのように全面撮影されたものではないが、撮影範囲を特定する上では利用可能である。各グリッドデータにおいてオリジナルデータ、グラウンドデータ及びオルソ画像データが整備されている。オリジナルデータは、ノイズを取り除き、調整用基準点を用いて標高値を調整した三次元座標データで、DSM のデータである。グラウンドデータは地表面の標高からなる三次元データで DTM のデータである。オルソ画像データは撮影した画像データにあるひずみを補正した画像データのことである。

取得したグリッドデータの Shape ファイルより、森林域における LiDAR 撮影箇所を面積ベースで算出した。森林域は、国土交通省の国土数値情報ダウンロードサービスにて公開されている最新の平成 23 年度の森林域のデータを採用した。(表 1-2-1 (3)ウ、及び巻末資料：図 各グリッドの LiDAR データの取得状況)。これらのデータによれば、5m グリッドの計測がもっとも広範に実施されており、全国の森林面積のうち約 53%を占め、ついで 1m グリッドのそれが約 40%となっている。一方で、最も地上解像度の高い 50cm グリッドにおいては、全国の森林面積に対して取得範囲が 1%以下である。巻末資料の図は各グリッドの LiDAR データ取得状況を図示したもので、緑色の範囲がデータ取得された場所を示している。

表 1-2-1 (3)ウ 森林域における LiDAR データ取得状況 (単位: Km²)

No	森林管理所	都道府県	各県森林面積	50cmグリッド		1mグリッド		2mグリッド		5mグリッド	
				撮影面積	取得率(%)	撮影面積	取得率(%)	撮影面積	取得率(%)	撮影面積	取得率(%)
1	北海道	北海道	55,425	165	0.3	6,626	12.0	918	1.7	11,021	19.9
		小計	55,425	165	0.3	6,626	12.0	918	1.7	11,021	19.9
2	東北	青森県	6,348	74	1.2	1,222	19.3	579	9.1	2,782	43.8
3		岩手県	11,725	9	0.1	1,342	11.4	1,807	15.4	5,533	47.2
4		宮城県	4,179	-	-	778	18.6	2,340	56.0	3,314	79.3
5		秋田県	8,395	-	-	1,712	20.4	1,022	12.2	3,529	42.0
6		山形県	6,686	97	1.5	2,774	41.5	656	9.8	4,542	67.9
		小計	37,333	180	0.5	7,828	21.0	6,404	17.2	19,700	52.8
7	関東	福島県	9,755	207	2.1	5,108	52.4	3,505	35.9	6,968	71.4
8		茨城県	1,875	-	-	640	34.1	143	7.6	1,603	85.5
9		栃木県	3,501	5	0.1	3,025	86.4	279	8.0	3,100	88.5
10		群馬県	4,242	13	0.3	3,717	87.6	37	0.9	3,740	88.2
11		埼玉県	1,213	-	-	1,041	85.9	25	2.1	1,217	100.3
12		千葉県	1,595	-	-	38	2.4	87	5.4	1,210	75.9
13		東京都	794	-	-	491	61.8	-	-	727	91.6
14		神奈川県	949	-	-	596	62.8	50	5.3	880	92.7
15		新潟県	8,569	253	2.9	4,811	56.1	496	5.8	5,988	69.9
16		静岡県	5,010	49	1.0	3,596	71.8	168	3.4	3,779	75.4
		小計	37,502	302	0.8	23,063	61.5	4,790	12.8	29,210	77.9
17	中部	富山県	2,840	32	1.1	1,524	53.7	199	7.0	1,726	60.8
18		長野県	10,697	91	0.9	7,731	72.3	8	0.1	5,557	52.0
19		岐阜県	8,616	35	0.4	6,466	75.0	237	2.8	6,289	73.0
20		愛知県	2,190	31	1.4	59	2.7	91	4.2	1,561	71.3
		小計	24,343	189	0.8	15,780	64.8	535	2.2	15,133	62.2
21	近畿中国	石川県	2,864	30	1.0	616	21.5	211	7.4	1,666	58.2
22		福井県	3,123	268	8.6	1,781	57.0	133	4.3	2,053	65.7
23		山梨県	3,477	127	3.7	3,419	98.3	-	-	976	28.1
24		三重県	3,726	35	0.9	3,153	84.6	13	0.3	3,325	89.2
25		滋賀県	2,043	19	0.9	793	38.8	-	-	886	43.4
26		京都府	3,426	115	3.4	1,030	30.1	34	1.0	1,747	51.0
27		大阪府	580	9	1.5	22	3.8	32	5.5	291	50.2
28		兵庫県	5,607	1	0.0	1,130	20.2	581	10.4	2,681	47.8
29		奈良県	2,848	4	0.2	2,347	82.4	7	0.2	2,256	79.2
30		和歌山	3,630	-	-	1,214	33.4	166	4.6	1,908	52.6
31		鳥取県	2,589	12	0.4	95	3.7	955	36.9	1,143	44.1
32		島根県	5,256	-	-	420	8.0	1,972	37.5	2,561	48.7
33		岡山県	4,838	-	-	103	2.1	2,137	44.2	2,930	60.6
34		広島県	6,121	-	-	1,341	21.9	1,368	22.3	2,874	47.0
35		山口県	4,374	-	-	1,354	31.0	431	9.9	2,003	45.8
		小計	54,502	621	1.1	18,818	34.5	8,040	14.8	29,299	53.8
36	四国	徳島県	3,139	-	-	2,215	70.6	273	8.7	1,166	37.2
37		香川県	876	1	0.1	47	5.4	84	9.5	806	92.0
38		愛媛県	4,011	-	-	2,235	55.7	316	7.9	2,635	65.7
39		高知県	5,968	-	-	5,775	96.8	75	1.3	3,560	59.6
		小計	13,993	1	0.0	10,273	73.4	747	5.3	8,167	58.4
40	九州	福岡県	2,218	-	-	634	28.6	-	-	1,191	53.7
41		佐賀県	1,111	43	3.9	765	68.8	-	-	1,099	98.9
42		長崎県	2,426	-	-	1,397	57.6	-	-	817	33.7
43		熊本県	4,638	126	2.7	3,100	66.8	-	-	3,643	78.5
44		大分県	4,535	-	-	2,826	62.3	158	3.5	3,609	79.6
45		宮崎県	5,899	0	0.0	5,517	93.5	194	3.3	5,470	92.7
46		鹿児島	5,842	46	0.8	3,338	57.1	-	-	3,317	56.8
47		沖縄県	1,046	-	-	15	1.4	11	1.1	-	-
		小計	27,715	216	0.8	17,591	63.5	363	1.3	19,145	69.1
合計			250,814	1,673	0.7	99,980	39.9	21,796	8.7	131,676	52.5

表中の“-”は撮影が実施されていないことを示し、撮影率(%)の“0”は、撮影率が1%以下であることを示す。なお表中の各都道府県の森林面積は林野庁ホームページ(<http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h24/1.htm>)から、最新のデータである平成24年度3月31日現在のものを採用している。

2) LiDAR による森林資源把握の事例

デジタル森林事業では、一部調査地で LiDAR データを取得しており、LiDAR データから林分の表層高(DSM)及び地表高(DTM)を求めている。その差分を DCHM(digital crown height model)を定義する。

レーザ計測 DSM・DTM による DCHM と林分蓄積の関係について、針葉樹の場合を図

1-2-1(3)ウ-1、広葉樹の場合を図 1-2-1(3)ウ-2 に示した。平均 DCHM と林分蓄積の直線回帰式の傾きはそれぞれ、針葉樹林が 35.3（データ数 23）、広葉樹林が 18.2（データ数 33）で、広葉樹林より針葉樹林の傾きの方が大きい結果となった。

誤差は、針葉樹林で平均誤差率 18.9%、平均誤差 88.2m³/ha、広葉樹林で平均誤差率 26.2%、平均誤差 62.0 m³/ha であった。

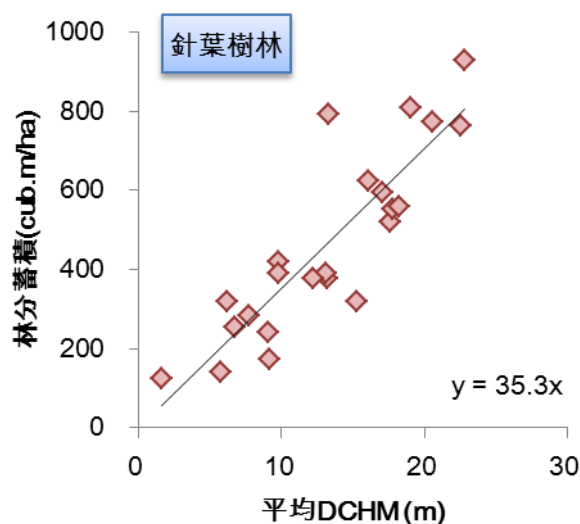


図 1-2-1(3)ウ-1 LiDAR による DCHM と蓄積の関係（針葉樹）

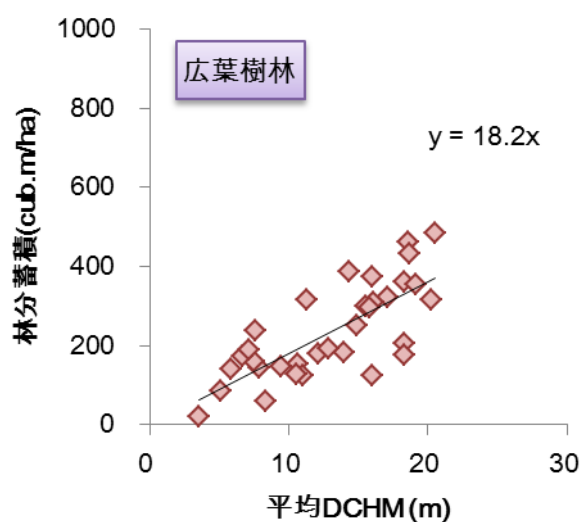


図 1-2-1(3)ウ-2 LiDAR による DCHM と蓄積の関係（広葉樹）

3) LiDAR 計測を活用した森林資源把握の研究レビュー

①統計的手法による林分因子の推定

LiDAR による森林計測の応用は、1990 年代に森林資源調査の分野から始まった。当初は

LiDAR のレーザー光の照射頻度が 100Hz 程度 (Nilsson, 1996) から 2~8,000Hz (Næsset, 1997a, 1997b; Magnussen and Boudewyn, 1998; Magnussen et al., 1999) と低く、林冠全体をフットプリント (FP) が覆うような計測が不可能であった。そのため、LiDAR を用いた森林計測においては、統計的手法を用いた林分因子の推定が行われた。

LiDAR が用いられた当初は、立木の梢端に当たる FP が少ないため LiDAR データから得られた林分樹高は 4m 前後過小推定であった (Nilsson, 1996; Næsset, 1997a)。Næsset (1997a)は、林分をグリッドに分割し、その中の計測値の最大値を用いることにより、林分樹高の推定誤差が-0.4m から 1.9m の範囲に収まることを報告した。林分材積については、レーザー光の 1 回の照射により得られる反射波形とそのときの地上高から推定する方法 (Nilsson, 1996) や林分樹高と林冠被覆率を用いた回帰式に当てはめる方法 (Næsset, 1997b) が提案されており、良好な推定結果が得られている。Magnussen and Boudewyn, (1998), Magnussen et al.(1999)は、LiDAR により得られた高さの値について 4 分位数を用いて林分樹高の推定を行っている。この研究は、100 分位数を説明変数として対数回帰させることにより林分因子を推定する研究へと展開した (Næsset and Bjerknes, 2001; Næsset and Økland, 2002; Næsset and Gobakken, 2005; Bollandsås and Næsset, 2007)。

②単木情報の抽出

1990 年代終わりから今世紀初頭にかけては、計測機器及び解析機器の飛躍的な向上により、FP が地上を覆い尽くすようにレーザー光を地上に照射することが可能となった。これにより一本一本の立木が複数の FP 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 (Hyypä and Inkinen, 1999; Hyypä et al., 2001; Person et al., 2002; Brandtberg et al., 2003)。これらの単木情報を抽出する際の基本的な処理技術は、すでに高分解能のデジタル空中写真等の画像処理技術として 1990 年代に確立していた (Gougeon, 1995a, 1995b; Wulder et al., 2000; Pitkänen, 2001)。これは、航空機搭載型高分解能多波長センサや高分解能衛星センサの開発により、リモートセンシングデータから単木レベルでの樹冠構造の把握が可能となるのに伴って研究が進化したためである。LiDAR データから作成される CHM では、梢端部分で高い値を、また樹冠の周辺部分では低い値をとり、デジタル空中写真や高分解能衛星データの輝度値と極めて近似した傾向をとる。このため、LiDAR データから単木情報を抽出するには、高分解能のデジタル空中写真等の画像処理技術をそのまま応用することが可能である。主な単木抽出の主な処理手法については古家 (2004) にまとめられている。

LiDAR による森林計測において得られるデータは、基本的には林冠表面及び地表面の 3 次元情報である。従って、高密度での地上照射により得られる情報は、林冠表面を形成する立木の樹高と、林冠表面に出ている樹冠の大きさである。空中から胸高直径を得ることはできないため、胸高直径については樹冠の大きさからアロメトリー式により推定することになる。材積はこれらの情報から推定することになる。立木密度については抽出された梢端の数から推定される。

梢端の抽出には、主に局所最大値フィルターが用いられる (Hyypä et al., 2001; Person et al., 2002; 平田, 2005; Takahashi et al., 2005)。その際、誤抽出を避けるために、DCM に平滑化フィルター処理を施したり (Person et al., 2002)、領域分割により得られた樹冠内に梢端として抽出された点が複数ある場合、最大値を梢端とする処理を行う方法 (Takahashi et al., 2005a) などが提案されている。

樹冠は領域分割処理により得られるが (Brandtberg et al., 2003)、通常、樹冠の大きさだけを森林情報として用いることはない。ここで得られた樹冠面積や樹冠直径が胸高直径と相対成長関係にあると仮定して、単木材積の推定 (Person et al., 2002) やその積み上げとして林分材積の推定が行われている (Hyypä et al., 2001)。さらに、樹冠直径については、領域分割処理を行わずに、梢端位置を通るラインを仮定して、LiDAR データのプロファイルの形状から推定する方法も提案されている (Popescu et al., 2003)。また、領域分割された領域内に含まれる計測点の地上高の特性から単木樹種を同定する (Holmgren and Person, 2004) などの展開がみられる。

4) LiDAR 計測を用いた地上部バイオマスの推定方法に関する議論

① LiDAR 計測による地上部バイオマス推定

LiDAR によって森林の地上部バイオマスを推定する場合、樹高や樹冠の情報から単木レベルでのバイオマスを推定し、それを足し上げて推定する方法と、林分レベルの林冠高あるいは林冠と地表との間の体積から蓄積推定する方法が考えられる。単木レベルの推定では、高密度でのレーザーの地上照射が必要である。樹高分布といった森林管理に有用な情報を得られが、データ解析が複雑となり、航空機計測を含め費用がかさむことが問題である。林分レベルの推定では、比較的低密度でのレーザー照射により蓄積を推定することが可能である。低密度での計測により費用が抑えられるが、低密度での計測では地上まで到達する単位面積当たりのレーザー光の数が減るため、地形の復元精度が低下し、結果として、蓄積推定精度が低下することになる。

LiDAR は、主に林冠で反射されるレーザーを計測するため、どのようなレーザー光の地上照射密度であっても地上部バイオマスを推定するためには、なんらかのモデル (推定式) が必要になる。計測データからの樹冠形の復元により樹種を推定することも試みられているが、特にバイオマスを推定する場合には、樹種に関する情報が必要となる。森林 GIS や空中写真などの情報を組み合わせた推定が必要である。

② マッピングの単位

LiDAR によってマッピングを行う場合、マッピングの単位をどのように設定するかが重要となる。森林 GIS など林分の境界の情報がある場合には、小班などのポリゴンを単位として単位面積当たりの蓄積を算出して、それぞれのポリゴンに割り当てればよい。森林 GIS のように既存情報がない場合、マッピングする単位を独自に設定する必要がある。LiDAR によるデータしかない場合、LiDAR データから林相を区分して、その結果をマッピングの

単位とすることになる。航空機レーザーデータから得られる情報としては、まず、林冠高の情報があげられる。また、レーザー光が林冠を透過する割合なども林相を区分する際の判断材料となる。空中写真や高分解能衛星画像がある場合、オブジェクトベースの分類を行って林相区分を行い、その結果を用いて地上部バイオマスのマッピングすることも可能である。

(エ) デジタル空中写真と LiDAR の組合せ

これまで見てきたように、リモートセンシング技術は、広域の森林を対象とした観測・計測に優れた技術であるが、それぞれのセンサにより長所、短所がある。そこでこれらの長所を活かし、短所を補うため、観測技術の複合的な活用が有効である。ここでは、デジタル空中写真と LiDAR を組み合わせることにより、どのように地上部バイオマスの推定に活用が可能かについて検討する。

1) デジタル空中写真と LiDAR を組み合わせた資源把握の事例

デジタル空中写真、LiDAR データ（レーザ）から取得する表層高（Digital Surface Model : DSM）と地盤高（Digital Terrain Model : DTM）から差分をとることにより、樹高を定義することができる（図 1-2-1(3)エ-1）として求めることができる。表層高の作成方法は、LiDAR データから作成する場合とデジタル空中写真から作成する場合の 2 通りがある。地盤高も LiDAR データから作成する方法と、国土地理院の 10m メッシュ標高データを利用する方法の 2 通りがあり、図 1-2-1(3)エ-2 のとおり組み合わせを整理できる。それぞれ精度と取得コストに差異があると考えられ、目的や用途によって適切に使い分けする必要がある。

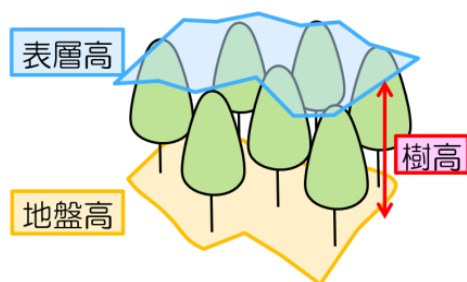


図 1-2-1(3)エ-1 ソースの違いによる高さの組み合わせ

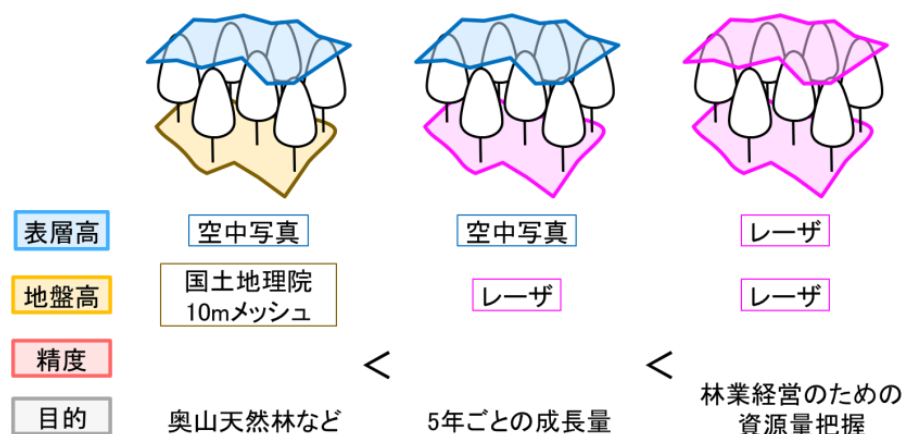


図 1-2-1(3)エ-2 ソースの違いによる高さの組み合わせ

解析プログラムでは、2 種類の方法により蓄積を推計する。

林分密度管理図からの蓄積推定方法の概念図は、図 1-2-1(3)エ-3 のとおりである。写真画像から頂点を抽出することで立木本数を推定、表層高データと地盤高データの差分から樹高を推定し、林分密度管理図から蓄積を求める。

現地調査との関係式から蓄積を推定する方法の概念図は図 1-2-1(3)エ-4 のとおりである。表層高と地盤高の間の樹冠容積が蓄積と関係を持つと考え、樹冠容積から平均樹高を求める。現地調査から求めた蓄積と、高さデータから求めた平均樹高の関係式に当てはめる。

なお、それぞれの方法において材積を求める式は、林分密度管理図では樹高、本数の他に係数が 5 つ必要であるが、現地調査からの関係式は樹高の他の係数は 1 つのみである。従来の森林調査においては、胸高直径の計測は容易であるが、樹高は梢端が視認できないなど、計測は困難であったため、直径を基本とする材積推定の方法が主体であった。林分密度管理図も本来は胸高直径、本数を指標として利用するものである。

一方、空中写真からのアプローチでは、胸高直径の推定より高さの推定の方が精度よく、容易である。このため、高さを主体とした直接推定である現地調査からの関係式を用いる手法が合理的であると言える。

林分密度管理図が作成されたのは昭和 50 年代であり、現在では間伐遅れの過密林分や、列状間伐、大径化した広葉樹林など、林分密度管理図の適用範囲が理論上困難な林分も増えている。これに対し、現地調査からの関係式を用いる手法は、地域毎に必要な関係式を作成することも比較的容易であり、多様な林分に対応可能であると言える。

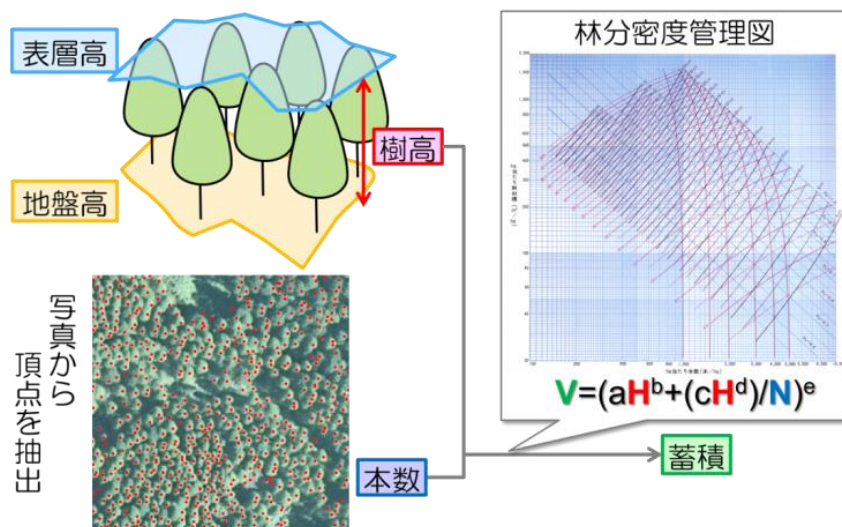


図 1-2-1(3)エ-3 林分密度管理図からの蓄積推定方法概念図

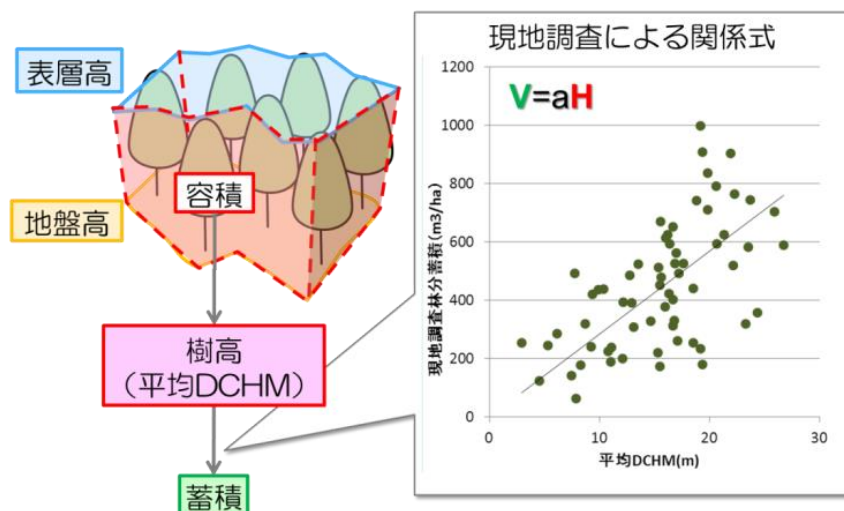


図 1-2-1(3)エ-4 容積からの蓄積推定方法概念図

デジタル森林事業では、コストと精度を考慮し、DSM はデジタル空中写真から、DTM には LiDAR を用い、上記の 2 手法による解析に加え、空中写真判読結果に基づく推計値を現地実測値の積み上げ数値を真値として比較を行った。また、現地調査箇所に含まれる森林簿データも参考値として示した。対象とした森林は、九州地方のスギ現地調査プロット 23 箇所である。

表 1-2-1(3)エ-1 蓄積推定手法の比較

方法	ヘクタール当たり蓄積の推定方法
現地調査積み上げ	・ 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

方法		ヘクタール当たり蓄積の推定方法
空中写真立体視		・ 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
解析プログラム	密度管理図	・ 写真表層高とレーザ地盤高から平均樹高を算出 ・ 写真から本数密度を算出 ・ 平均樹高、本数密度から密度管理図により求める
	容積	・ 写真表層高とレーザ地盤高から平均樹高を算出 ・ 現地調査結果との関係式により求める
森林簿		・ 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（地番がプロットに対し大きい、森林簿の林相単位の位置は特定できない）

蓄積の推定結果と現地調査結果の比較を図 1-2-1(3)エ-5 に示す。誤差率が低く、精度が比較的高かったのは「空中写真立体視」と「解析プログラム（容積）」であった。「解析プログラム（密度管理図）」は誤差率が 30%程度であった。森林簿の誤差率は 6 割近くあり、過少な値となっている。

解析プログラムの蓄積推定機能は、地表高データに LiDAR データを用いる場合は、現地実測値に対する 7 割から 8 割の精度が期待できる。森林簿の現地実測値との誤差率がより大きいことを考慮すれば、実利用可能な精度とも考えられる。

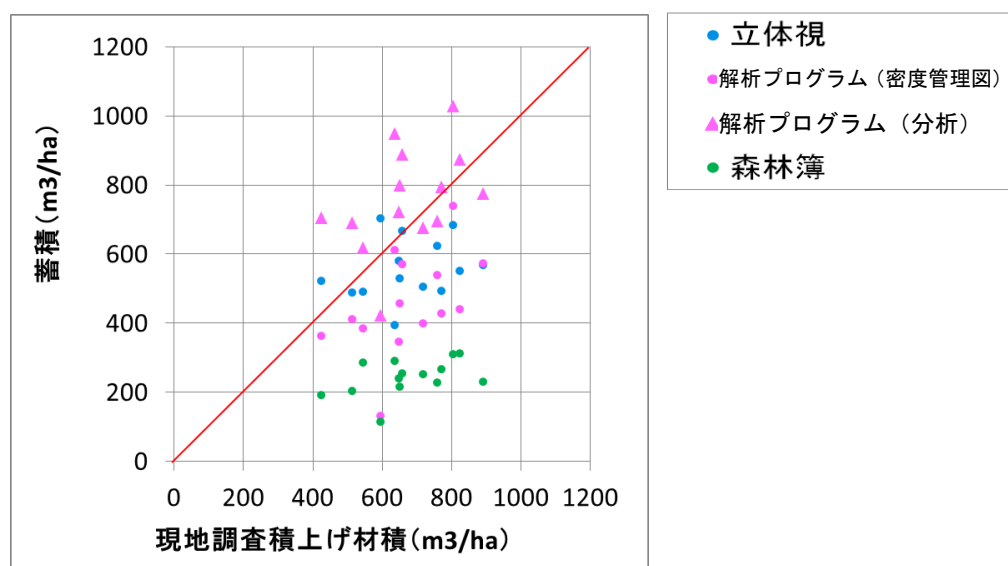


図 1-2-1(3)エ-5 各手法による推定結果の比較

表 1-2-1(3)エ-1 各手法による蓄積の誤差率

誤差率	立体視（密度管理図）	解析プログラム（密度管理図）	解析プログラム（容積）	森林簿
平均	21.0	31.9	23.1	63.5
最大	38.2	78.3	65.5	80.9
最小	1.1	4.4	2.9	47.9

誤差率（％）＝絶対値（各手法の推定蓄積－現地調査蓄積）÷ 現地調査蓄積

2) デジタル空中写真と LiDAR 計測を組み合わせた手法の提案

LiDAR による森林計測は森林の 3 次元構造を捉えられることから、LiDAR データからどのような森林情報をどの程度の精度で抽出できるのかといった研究が進められてきた。しかしながら、LiDAR を用いた森林計測もリモートセンシング技術の一つであり、デジタル空中写真などと組み合わせて用いることにより（田口ら, 2006）、お互いのデータの長所を活用することが可能となる。

現在、デジタル空中写真から復元される DSM の精度は非常に高く、2 時期の撮影を行い、それぞれの撮影で得られた DSM の差分を計算することにより、伐採などの森林変化はもちろん、樹高の成長についても捉えることができる。また、どこかの時点で LiDAR を用いて DTM を取得できれば、これとデジタル空中写真による DSM とから CHM を作成することが可能となるため、成長のみならず、地上部バイオマスについても高精度で推定することが可能となる。デジタル空中写真の撮影の方が LiDAR 計測によるデータ取得よりも安価であることから、毎回 LiDAR 計測を実施して地上部バイオマスを推定するより実現性が高い。

表 1-2-1(3) ウ ①にあるように、LiDAR による 1m グリッドのデータ整備も着実に進んでおり、5m までグリッドサイズを落とすことで、全国のかかなりの森林がカバーされることになる。DTM に関しては、林地が表層の流失で絶えず動いており、また、斜面崩壊が発生している箇所もあるが、森林全体からみて、林冠高の推定に大きな影響を及ぼすほどではない。このため、国土全体の高精細の DTM を作成するための整備率は上がっていくと考えられ、このデータを利用して、デジタル空中写真からの DSM と組み合わせることにより、地上部バイオマスを推定することが推定精度の向上につながると考えられる。

【参考文献】

Asner, G.P. and Warner, A.S. (2003) Canopy shadow in IKONOS satellite observations of tropical forests and savannas. Remote Sens. Environ. 87: 521-533.

栗屋善雄・古家直行・高橋興明 (2007) IKONOS データと eCognition を用いた樹種分類－秋田県米内沢での事例－. 関東森林研究 58 : 51-54.

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.
- Bollandsås, O.M. and Næsset, E. (2007) Estimating percentile-based diameter distributions in uneven-sized Norway spruce stands using airborne laser scanner data. *Scand. J. For. Res.* 22: 33-47.
- Carleer, A. and Wolff, E. (2004) Exploitation of very high resolution satellite data for tree species identification. *PE & RS* 70: 135-140.
- Culvenor, D.S. (2003) Extracting individual tree information: A survey of techniques for high spatial resolution imagery. In *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and case studies*. Wulder, M.A. and Franklin, S.E. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht and London, 255-277.
- Franklin, S.E., Wulder, M.A., and Gerylo, G.R. (2001) Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *Int. J. Remote Sens.* 22: 2627-2632.
- Fuller, D.O. (2005) Remote detection of invasive *Melaleuca* trees (*Melaleuca quinquenervia*) in South Florida with multispectral IKONOS imagery. *Int. J. Remote Sens.* 26: 1057-1063.
- 古家直行・平田泰雅 (2002) 高分解能衛星画像を用いたスギ・ヒノキ人工林の単木抽出の精度と限界. *日林関東支論* 54 : 53-54.
- 古家直行 (2004) 単木樹冠. 150-153, *森林リモートセンシング* (加藤正人編) , 273pp, 日本林業調査会, 東京.
- 古屋直行・平田泰雅・鈴木 誠・山本博一 (2006) 高解像度衛星パナクロマティック画像上での単木樹冠濃淡情報. *日林関東支論* 57 : 49-50.
- Gougeon, F.A. (1995) Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS images. *Can. J. Remote Sens.* 21: 1-9.
- Gougeon, F.A. (1995a) Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS images. *Can. J. Remote Sens.* 21: 1-9.
- Gougeon, F.A. (1995b) A crown-following approach to the automatic delineation individual tree crown in high spatial resolution aerial images. *Can. J. Remote Sens.* 21: 274-284.
- Gougeon, F.A. and Leckie, D.G. (2006) The individual tree crown approach applied to Ikonos images of a coniferous plantation area. *PE & RS* 72: 1287-1297.
- Greenberg, J.A., Dobrowski, S.Z., and Ustin, S.L. (2005) Shadow allometry: Estimating tree structural parameters using hyperspatial image analysis. *Remote Sens. Environ.* 97: 15-25.

- Hall, O., Hay, G.J., Bouchard, A., and Marceau, D.J. (2004) Detecting dominant landscape objects through multiple scales: An integration of object-specific methods and watershed segmentation. *Landscape Ecol.* 19: 59-76.
- Hay, G.J., Castilla, G., Wulder, M.A., and Ruiz, J.R. (2005) An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. *Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation* 7: 339-359.
- Hirata, Y., Sato, K., Kuramoto, S., and Sakai, A. (2004) Extracting forest patch attributes at the landscape level using new remote sensing techniques – An integrated approach of high-resolution satellite data, airborne lidar data and GIS data for forest conservation. In *Monitoring and Indicators of Forest Biodiversity in Europe – From Ideas to Operationality*. Marchetti, M. (ed.), European Forest Institute, Joensuu, 359-367.
- 平田泰雅 (2005) 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* 39: 81～95.
- Hirata, Y. (2008) Estimation of stand attributes in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands using QuickBird panchromatic data. *J. For. Res.* 13: 147-154.
- Holmgren J. and Perrson, Å. (2004) Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sens. Environ.* 90: 415-423.
- Hyyaää, J. and Inkinen, M. (1999) Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogramm. J. Finland* 16: 27～42.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikainen, 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.
- Ivits, E., Koch, B., Blaschke, T., Jochum, M., and Adler, P. (2005) Landscape structure assessment with image grey-values and object-based classification at three spatial resolutions. *Int. J. Remote Sens.* 26: 2975-2993.
- Johansen, K., Coops, N.C., Gergel, S.E., and Stange, Y. (2007) Application of high spatial resolution satellite imagery for riparian and forest ecosystem classification. *Remote Sens. Environ.* 110: 29-44.
- Kato, M. (2004) Classifying tree species in a northern mixed forest using high-resolution IKONOS data. *J. For. Res.* 9: 7-14.
- 河邑 眞・辻野和彦・辻子祐二 (2005) 高分解能衛星画像を用いたディジションツリー法に基づく樹種分類法の開発. *写真測量とリモートセンシング* 44(2) : 54-67.
- Kayitakire, F., Hamel, C., and Defourny, P. (2006) Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sens. Environ.* 102: 390-401.
- Leckie, D.G., Gougeon, F.A., Walsworth, N., and Paradine, D. (2003) Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote*

- Sens. Environ. 85: 355-369.
- Leckie, D.G., Jay, C., Gougeon, F.A., Sturrock, R.N., and Paradine, D. (2004) Detection and assessment of trees with *Phellinus weirii* (laminated root rot) using high resolution multi-spectral imagery. *Int. J. Remote Sens.* 25: 793-818.
- 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 Lriccia, V.N. (1999) Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *For. Sci.* 45: 407~422.
- 松英恵吾 (2004) 主成分分析・テクスチャ解析. (森林リモートセンシング基礎から応用まで. 加藤正人編, 日本林業調査会, 東京). 98-101.
- 村上拓彦 (2004) オブジェクトベースの分類. (森林リモートセンシング基礎から応用まで. 加藤正人編, 日本林業調査会, 東京). 112-115.
- Næsset, E. (1997a) Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS J. Photogramm. & Remote Sens.* 52: 49~56.
- Næsset, E. (1997b) Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.* 61: 246~253.
- Næsset, E. and Bjerknes, K.-O. (2001) Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner. *Remote Sens. Environ.* 78: 328-340.
- Næsset, E. and Økland, T. (2002) Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sens. Environ.* 79: 105-115.
- Næsset, E. and Gobakken, T. (2005) Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.* 96: 453-465.
- Nilson, M. (1996) Estimation of tree height and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens. Environ.* 56: 1-7.
- 大西紀子・村上拓彦・吉田茂二郎 (2004) IKONOS データを用いた屋久島南部の林相区分— object ベースと pixel ベースの分類比較—. *九州森林研究* 57 : 200-202.
- Persson, Å., Holmgren, J. and Söderman, U. (2002) Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogramm. Engineering & Remote Sens.* 68: 925~932.
- Pitkänen, J. (2001) Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Can. J. For. Res.* 31: 832~844.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H. and Nelson, R.F. (2003) Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Can. J. Remote Sens.* 29: 564-577.
- 林野庁 (2003) 平成 14 年度森林資源モニタリング調査データ地理解析事業 (リモートセンシング資源解析事業) 報告書. 139pp, 林野庁, 東京.

- 林野庁 (2004) 平成 15 年度森林資源モニタリング調査データ地理解析事業（リモートセンシング資源解析事業）報告書. 130pp, 林野庁, 東京.
- 林野庁 (2005) 平成 16 年度森林資源調査データ解析事業（リモートセンシング資源解析事業）報告書. 174pp, 林野庁, 東京.
- 林野庁 (2006) 平成 17 年度森林資源調査データ解析事業（リモートセンシング資源解析事業）報告書. 212+149pp, 林野庁, 東京.
- 資源・環境観測解析センター (1996) 新編リモートセンシング用語辞典. 291pp, 資源・環境観測解析センター, 東京.
- Song, C. and Woodcock, C.E. (2003) Estimating tree crown size from multiresolution remotely sensed imagery. *PE & RS* 69: 1263-1270.
- St-Onge, B.A. and Cavayas, F. (1995) Estimating forest stand structure from high resolution imagery using the directional variogram. *Int. J. Remote Sens.* 16: 1999-2021.
- St-Onge, B.A. and Cavayas, F. (1997) Automated forest structure mapping from high resolution imagery based on directional semivariogram estimates. *Remote Sens. Environ.* 61: 82-95.
- 田口仁・臼田裕一郎・福井弘道・古川邦明 (2006) 高解像度光学センサ衛星画像と LiDAR を組み合わせた森林域の冠雪害検出手法の開発. *写真測量とリモートセンシング* 45(1): 14~21.
- 高木幹雄・下田陽久 (1991) 画像解析ハンドブック. 775pp, 東京大学出版会, 東京.
- 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.
- Wang, L., Gong, P., and Biging, G.S. (2004) Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *PE&RS* 70 : 351-357.
- Wulder, M., Niemann, K.O. and Goodenough, D.G. (2000) Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sens. Environ.* 73: 103-114.
- Wulder, M., Niemann, K.O., and Goodenough, D.G. (2002) Error reduction methods for local maximum filtering of high spatial resolution imagery for locating trees. *Can. J. Remote Sens.* 28: 621-628