

ラジコンヘリコプターを用いた森林材積推定に関する研究 —信州大学農学部農学部構内演習林を事例として—

信州大学 農学部森林科学学科 4年 ○松尾^{まつお} 好高^{よしたか}

要旨

信州大学農学部構内演習林のカラマツとヒノキの純林に対して、プロットを設置しラジコンヘリコプターFalconで撮影した高分解能画像と、それを元にしたDCHM画像を用いて材積推定を行いました。その結果、全てのプロットで精度88%以上と高い精度を得ることができました。この値は同一プロットに対して行われた航空機LiDAR(航空機レーザー)の材積推定精度よりも高い値を示し、ラジコンヘリコプターの有効性を示す結果となりました。

はじめに

近年の日本林業を取り巻く諸課題には施業・管理の低コスト化・省力化、施業履歴や森林情報の管理の効率化が取り上げられています。実際に林業現場においては、人手不足により林分把握の困難化、またそれに伴う森林簿の更新の遅れや精度の低下といった問題が生じています。こういった流れの中で、リモートセンシングによる林分材積の把握に対して、森林調査の省力化に期待が寄せられています。これまでの導入例としては、人工衛星や航空機を用いた広範囲なリモートセンシングの利用が挙げられます。これらに対し、本研究では、これらの手法よりも現場作業者が即応的・高精度な資源把握に活用できる手法としてラジコンヘリコプターに着目しました。

今回使用したラジコンヘリコプターには現地への迅速な展開が可能といった高機動性や、飛行高度を容易に変更することで高解像度画像を簡易に取得できるといった長所があります。また、今回使用したFalconは自律飛行が可能で、急傾斜地や災害地でも作業者の安全を確保した状態で調査が行える点も重要です。さらに、作業者は直接目視による操縦を行う必要がないため、地上から上空を見渡せない高密度林分や複雑な地形下でも差し障り無く作業が行えます。このように高い利便性を持っているものの、現在Falconで森林材積を推定した前例はありません。

1 目的

そこで、本研究では、Falconを用いて以下の2点を念頭に研究を行いました。

(1) 高精度林分材積推定

空間分解能5.5cmの高分解能画像を用い、現場作業による材積計測の補完的役割を目的としました。

(2) 現地調査作業の省力化

現地データが十分に存在しない林分を対象に、現地調査の省力化を考慮して、現地調査データを極力利用しない高精度な材積推定を行うことを目的としました。

尚、本研究の調査地である信州大学構内演習林においては、2008年に信州大学の望月友裕による「航空機データによる樹種別本数と資源把握」、2010年には同大学の川内洋輔による「リモートセンシングを用いた信州大学構内演習林のバイオマス推定」という題目でそれぞれ研究を行っており、それらとの対比を行うことが可能です。また、川内の研究は航空機LiDARを用いたものであり、ラジコンヘリコプターによる材積推定との比較が可能ということは重要であると言えます。

2 調査地・プロット概要

(1) 調査地概要

研究調査地である信州大学農学部構内演習林は長野県の南部、上伊那郡南箕輪村に位置します。伊那谷を通る天竜川の侵・隆起により形成された河岸段丘上にあり、標高は770mです。演習林内は傾斜の少ない平地林で、信州ローム層に覆われています。この演習林の林況は、天然性のアカマツ、植栽されたカラマツ・ヒノキがそれぞれ上層を占めています。施業に関してはアカマツ・ヒノキ・カラマツ等の上層林におおむね中程度から疎な密度管理を適用しており、順次抜き伐りによる大径化を図っています。傾斜の影響を受けることなく研究を行えることからリモートセンシングを利用するにあたって良好な環境といえます。

(2) プロット概要

構内演習林の長野県上伊那郡南箕輪村信州大学農学部構内演習林において、カラマツとヒノキの人工林内に25m×25mのプロットを各2プロットずつ、計4プロット設置しました。また、各樹種間においても、立木密度や樹冠の形質に違いが見られました。

表-1 各プロット概要

	立木密度 (本/ha)	林齢 (年)	林分現況
カラマツ 1	640	53	林内では個体間競争が見られ、個体間にサイズのバラつきが生じています
カラマツ 2	400	55	上層木はカラマツで、下層木はスギの二段林です。TrueOrtho 画像では下層のスギは明瞭に観測できないため、解析していません
ヒノキ 1	464	63	林床は明るく下層植生が多いものの、上層のヒノキには個体間競争が見られ、サイズにバラつきが生じています
ヒノキ 2	512	68	ヒノキプロット1よりも立木密度が高いですが、個体間でのサイズのバラつきは少ないです

3 使用した調査データ・機器・画像データ

(1) 現地調査データ

各プロットの全上層木を対象に直径割巻尺を用いてDBHをmm単位で測定しました。また、超音波測高計バーテックスⅢを用いて樹高を0.1m単位で測定しました。

(2) 使用機器・解析ソフト

2010年12月21日に、株式会社情報科学テクノシステムがFalcon-PARs(図-1)を用い、空間分解能5.5cmの3バンド画像を撮影しました。また、TrueOrtho画像と高さデータを示すDCHM画像の作成を同社に委託し、これらの画像を取得しました。

その他の使用したソフト、データは表-2に示しました。



図-1 Falcon-PARs

表-2 解析ソフト

画像解析ソフト : Geomatica9.1.8(PCI, Canada)
GIS ソフト : ArcGIS 9.3.1(ESRI, USA)
表計算ソフト : Excel 2007(Microsoft, USA)
長野県人工林密度管理図 http://www.pref.nagano.jp/xrinmu/ringyosen/index.htm

(3) 画像データ

2010年12月21日に Falcon-PARs(図-1)を用い、空間分解能 5.5cm の 3 バンド画像を 600 枚ほど撮影しました。これらの画像をオルソ化して張り合わされてできたのが TrueOrtho 画像(図-2)です。この 600 枚の画像はそれぞれオーバーラップされているため、視差を利用して高さ情報を抽出することが可能であり、数値表層モデル(DSM)の作成が可能です。これに地盤標高データ(DTM)を差し引くことで樹冠高を表す数値樹冠高モデル(以下、DCHM 画像)(図-3)が得られるので、樹高を求めることが可能となります。

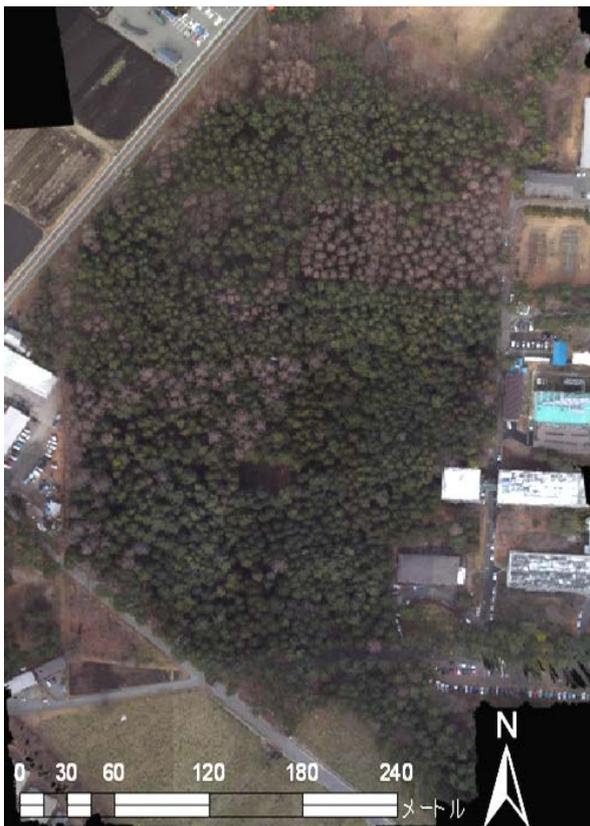


図-2 TrueOrtho 画像

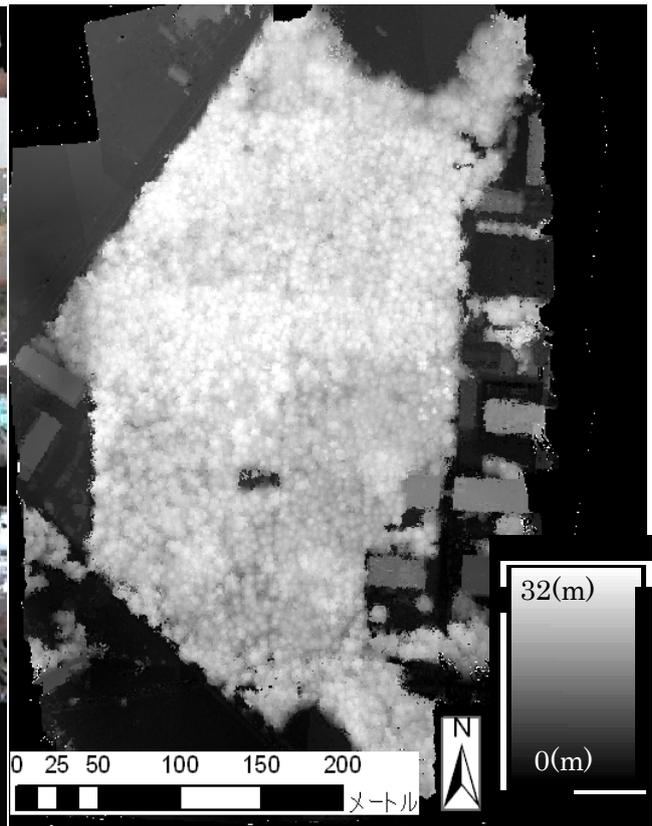


図-3 DCHM 画像

(4) 使用した推定式

$$\text{推定率 (\%)} = 100 - \frac{\text{現地調査データ} - \text{リモートセンシングデータ}}{\text{現地調査データ}} \times 100$$

4 研究の流れ

本研究では現地調査から算出した材積を真値として、リモートセンシングから得たデータを用いて材積を2パターンで推定し、各プロットの精度を検証しました。

(1) 精度検証で用いる真値の計測

現地調査より得た標準木 DBH・樹高のデータから、立木幹材積表を用いて材積を算定しました。

(2) リモートセンシングによる解析

上述した TrueOrtho 画像と DCHM 画像から立木本数と樹高を推定して、2通りの推定方法を用いて材積を推定しました。解析については次項で紹介します。

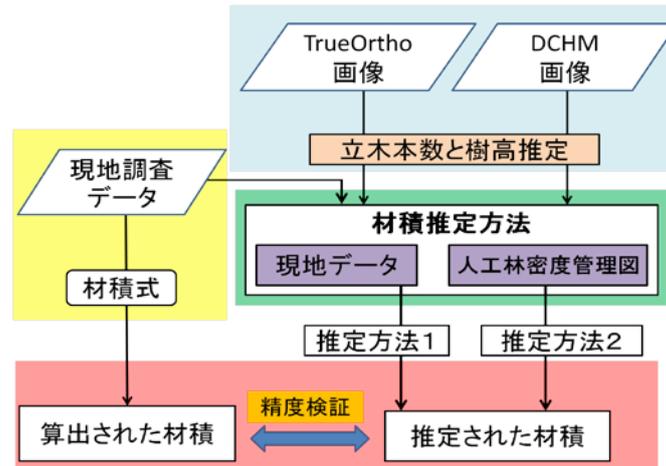


図-4 研究のフローチャート

5 立木本数及び樹高推定

(1) 解析手順

画像解析では Geomatica 9.1.8 の ITC Suite (Individual Tree Crown) を用いました。解析手順を示したフローチャートは以下のものです。はじめに TrueOrtho 画像から樹頂点を抽出しました。抽出の原理として、樹頂点は日光をよく受けることからピクセルごとの輝度値が高くなることを利用しています。次に、ArcGIS を用いて得られた樹頂点を DCHM 画像に重ね合わせました。これにより、樹頂点ごとの高さが推定できるので、これを単木単位での樹高データとしました。

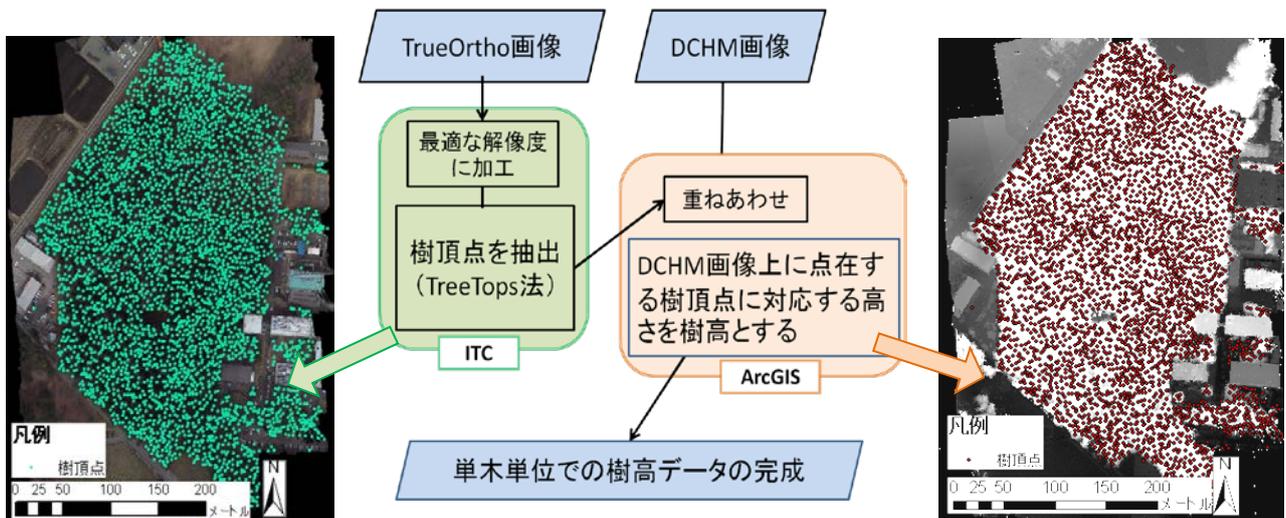


図-5 立木本数・樹高解析フローチャート

(2) 立木本数と樹高の推定結果

推定結果としては以下の表のようになりました。立木本数においては樹冠サイズが推定精度に影響していました。カラマツ1とヒノキ1は樹冠サイズにバラつきが見られ、小さい樹冠の樹頂点は大きな樹冠の枝葉と誤分類したため、抽出されませんでした。一方、ヒノキ1は手入れ不足の高密度林分であるものの、一斉林であり樹冠サイズのバラつきが少ないため、立木本数の推定結果が良くなりました。

表-3 立木本数・樹高解析結果

	本数(本)		樹高(m)		[推定精度%]
	現地	リモセン	現地	リモセン	
カラマツ1 [%]	40	36 [90.0]	22.81	21.06 [92.3]	
カラマツ2 [%]	25	24 [96.0]	27.21	26.27 [96.5]	
ヒノキ1 [%]	29	26 [89.7]	23.64	23.22 [98.2]	
ヒノキ2 [%]	32	30 [93.8]	23.50	23.61 [99.5]	

6 材積推定方法

(1) 材積推定方法 1

現地調査で得た標準木(1プロットにつき10本のサンプル)のDBH・樹高データから回帰式を作成し、これにリモートセンシングで推定した上層木の樹高を代入し、単木ごとのDBHを算出しました。この単木ごとのDBHとリモートセンシングで得られた樹高データ(以下、推定樹高)を、立木幹材積表へ代入することで単木単位の材積を推定しました。特長として、現地の林況を反映した推定が行えますが、現地調査で標準木を選木し、DBHと樹高を測定しなければならないことが欠点となっています。この推定方法は、現地調査が必要ですが、単木単位での材積の算出が可能な点が利点です。

- ア 現地で標準木の樹高とDBHから回帰式を作成しました。
- イ 求めた推定樹高を一つずつ代入して、標準木以外の全ての立木ごとのDBHを推定しました。
- ウ イで求めたDBHと推定樹高を立木幹材積表に代入して算出しました。

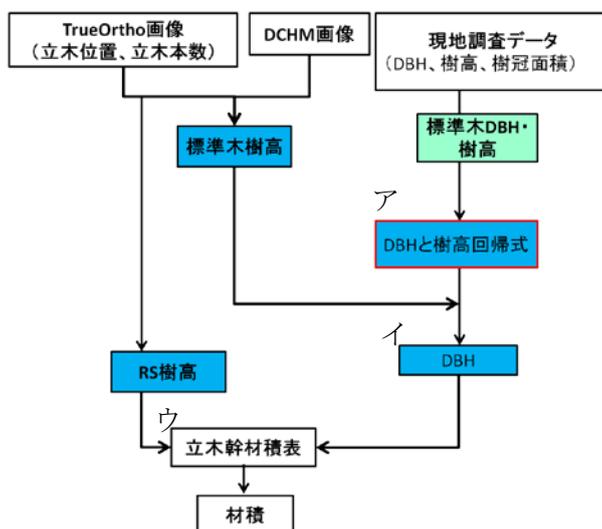


図-6 推定方法2のフローチャート

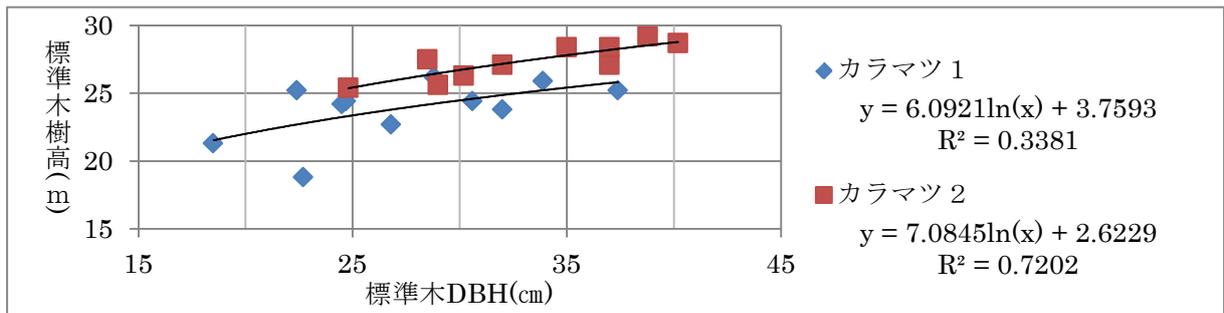


図-7 カラマツプロット1・2の回帰式

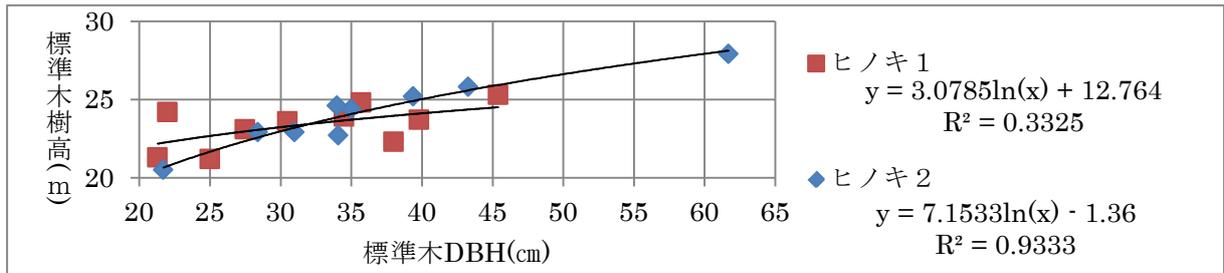


図-8 ヒノキプロット1・2の回帰式

(2)材積推定方法2

長野県人工林密度管理図を用いて、材積(m³/ha)を求めました。この推定方法の特長は、現地調査が不要ですが、森林簿が存在する単一樹種の一斉人工林に利用が限定されてしまうことです。人工林密度管理図は長野県林業総合センターがWeb上で一般公開しているものですので、誰でも無料で利用できます。今回使用した林齢は「演習林第八次編成教育計画(信州大学AFC)」から得たものです。

ア 推定樹高と森林簿から得た林齢の情報から地位を判定しました。

イ 樹頂点抽出から判明した立木本数から当該林分の1ha当たりの立木密度を算出しました。

ウ アとイから得た、地位級・林齢・立木密度を長野県人工林密度管理図に代入して、1haあたりの材積を算出しました。

エ 本研究ではプロット内の材積を比較しているため、人工林密度管理図から得られた材積とプロット面積の平方の積をプロット内の材積として推定しました。

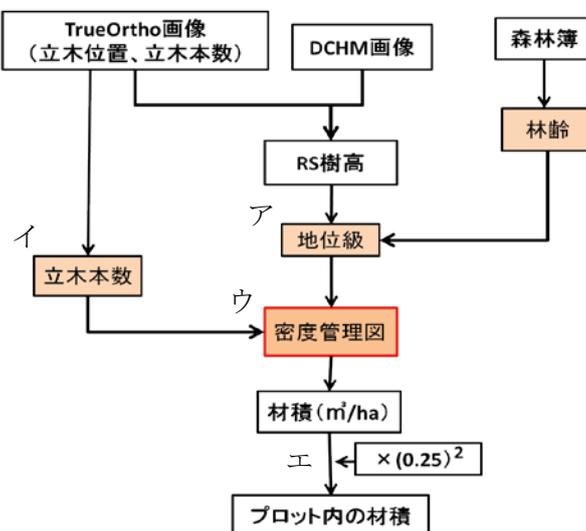


図-9 推定方法3のフローチャート

カラマツ		林齢・密度の入力表			
地位級	林齢(年)	樹高(m)	密度(本/ha)		
II	53	25.74	640		
収穫予想結果(カラマツ人工林)					
林齢 (年)	53	58	63	68	73
樹高 (m)	25.7	26.5	27.1	27.5	28.0
林分密度 (本/ha)	640	640	640	640	640
胸高直径(cm)	26.0	26.4	26.6	26.8	27.0
幹材積(m ³ /ha)	48	50	51	52	527
収量比数	0.88				0.92
林分形状比	99				104

図-10 長野県人工林密度管理図 (カラマツプロット1)

7 結果

推定方法 1 は単木単位の材積推定が行えたので単木単位で材積精度を検証しました。図-11~図-14のグラフでは、現地調査により求めたプロット内全立木の材積を X 軸に、推定された単木単位での材積を Y 軸としました。X 軸上の点は樹頂点が抽出できなかった個体です。

現地調査データで求めた材積と、推定方法 1・2 により算出された 2 つの材積推定値をそれぞれ比較し、表-4 に示しました。尚、推定方法 1 の値は単木材積の積算値です。

また、同一のプロットを対象として 2010 年に行われた航空機 LiDAR による材積推定と比較したところ、Falcon の有効性の高さを示唆する結果となりました。

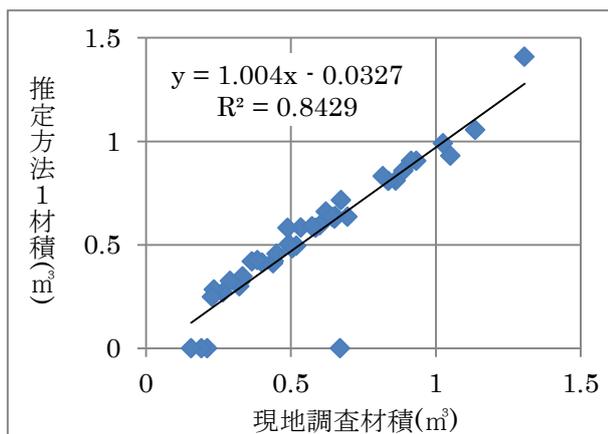


図-11 カラマツプロット 1

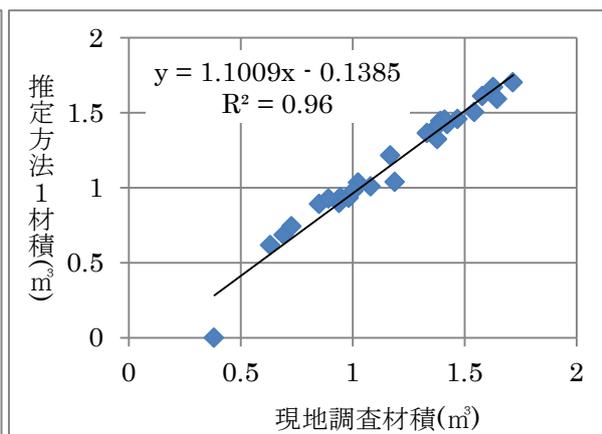


図-12 カラマツプロット 2

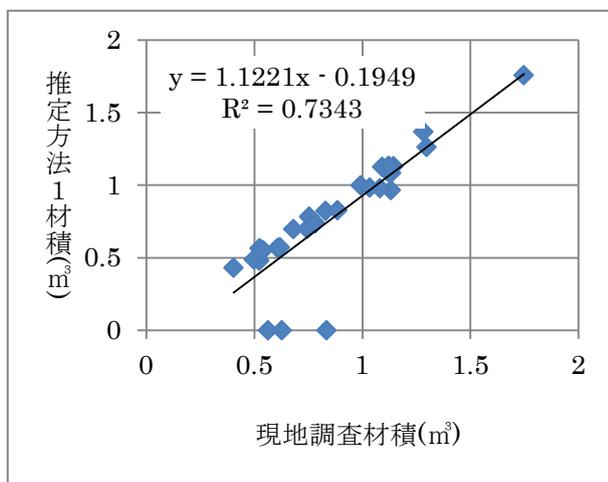


図-13 ヒノキプロット 1

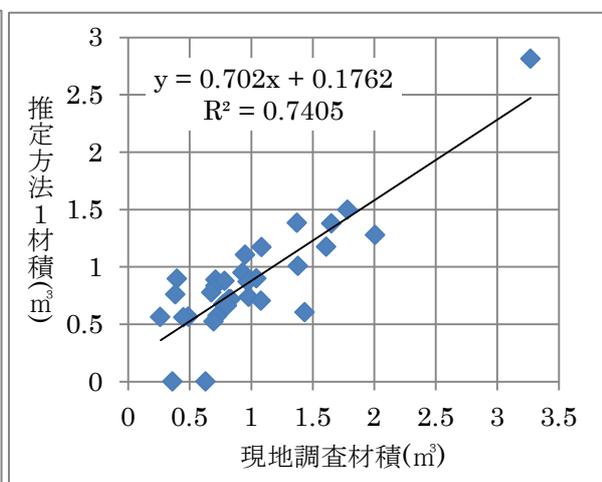


図-14 ヒノキプロット 2

表-4 材積推定結果

	現地調査	リモートセンシング		航空機 LiDAR
		推定方法1	推定方法2	
カラマツプロット 1	23.73	22.48 (94.7%)	24.06 (98.6%)	29.83 (74.3%)
カラマツプロット 2	30.41	29.88 (98.2%)	28.69 (94.3%)	40.66 (66.3%)
ヒノキプロット 1	25.38	22.82 (89.7%)	25.69 (98.8%)	
ヒノキプロット 2	32.11	31.13 (96.9%)	28.56 (88.9%)	43.05 (66.1%)

(推定精度%)

8 考察

本研究で求められた推定値はどの推定方法においても、高い値を示すことができた上に、現地調査の負担軽減も期待できる結果となり、はじめに述べた目的を達成することができました。しかし、プロット毎の精度のバラつきや、推定方法についても一概に最も精度の優れた手法は示唆されませんでした。以下では、各推定方法について考察します。

推定方法1において、ヒノキプロット1の材積推定精度は89.7%という結果となりました。このプロットでは立木本数の抽出精度が他のプロットより低い値でした。推定方法1では単木単位での材積推定なので、本数の多少が材積推定精度に影響したものと考えられます。ヒノキプロット1の単木単位での材積推定精度は、図-13のR²が0.7343と最も低かったことから、立木本数の抽出精度が推定結果に影響したと考えられます。

推定方法2の中では、ヒノキプロット2が最低の値を示しました。この原因としては、人工林密度管理図に上手く適合しなかったためと考えられます。人工林密度管理図を用いた際に、管理図が示す樹高と推定樹高に大きな差が生じました。それにより、密度管理図を用いた材積推定値と真値に差が生じたと考えられます。なお、ヒノキプロット2における推定樹高は真値に対して99.5%の精度を示しており、推定樹高の値に問題があるとは考えられません(図-15)。密度管理図の示す樹高と推定樹高に差が生じてしまう問題については、密度管理図の特性を把握した上で利用しなければならないことがわかりました。

ヒノキ		林齢・密度の入力表		
	地位級	林齢(年)	樹高(m)	密度(本/ha)
	II	68	22.79	512

収穫予想結果(ヒノキ人工林)		
林齢(年)	68	
樹高(m)	22.8	23.4
林分密度(本/ha)	512	512
胸高直径(cm)	31.0	31.4
幹材積(m ³ /ha)	457	480

平均樹高の実測値は23.5mで、推定樹高は23.6m(精度99.5%)であったが、密度管理図の数字とズレが生じました

図-15 ヒノキプロット2の人工林密度管理図

おわりに

今後の課題として重要だと思われる課題を3点挙げます。第一に費用が高いということです。第二に傾斜地で利用した際の起こりうる問題を研究することです。第三には山林における多面的利活用の模索をすることです。これらが考えられます。

費用について述べると、撮影委託は1haあたり7万円と非常に高価です。同様に機体価格が490万円であることを考慮すると、Falconを林業の現場で普及させることはまだ現実的ではありません。次に、急傾斜地で導入した際に起こると想定される問題ですが、DCHM画像は、DSM（表面高）からDTM（地盤高）の差を求めて作成されています。しかしながら、DTMは航空機レーザーによる10mメッシュにより作成されています。つまり、本調査地のような平地林においては問題にならなかったものの、急傾斜地で多くの微地形や地形変換点を含む傾斜地林分においては、DCHM画像の高さ精度が悪化する恐れがあります。最後の多面的利活用の模索ですが、Falconのような全自動の無人航空機（UAV）は、災害現場などに迅速に展開が行える上に、作業者の安全も確保されている点を考えると、林業的利用以外の視点からの利活用も検討が可能です。こういった林業的利用やそれ以外への活用という点からも、関係各所などとの意見交換などが望まれます。また、高機動性であるため、季節ごとの植物活性などを調査することへの利用や土砂災害地の迅速な観測も可能であり、これらの利活用を検討することも重要です。

〈参考文献〉

1. 川内洋輔 (2011): リモートセンシングを用いた信州大学構内演習林のバイオマス推定, 23-25pp, 27-28pp
2. Francois Gougeon (2003): Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis, Canada Remote Sensing, Vol.29, No.5, 663-649pp
3. Francois Gougeon (2005): The Individual Tree Crown (ITC) Suite Manual, Canada Forest Service, 50pp
4. アルプス圏フィールド科学技術センター (2003): 演習林第八次編成教育研究計画: 1-5pp, 51-53pp
5. 林野庁計画課 (2007): 立木幹材積表 東日本編, 日本林業調査会, 333pp
6. 長野県林業総合センター
長野県人工林密度管理図 <http://www.pref.nagano.jp/xrinmu/ringyosen/index.htm> 2011. 2. 20