

京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発
—航空機 Lidar によるカラマツ林の樹冠計測と材積・
炭素重量計測精度の検証—

米 康充・小熊宏之・山形与志樹

Development of Measurement System for the Carbon Sinks under the Kyoto Protocol
—Measurement of Stem Volume and Carbon Weight of *Larix leptolepis* Stand by Airborne Lidar—

Yasumichi YONE, Hiroyuki OGUMA and Yoshiki YAMAGATA

日本リモートセンシング学会誌別刷

Journal of Remote Sensing Society of Japan

Vol. 22 No. 5 (2002) pp. 531-543

京都議定書に関わる吸収源計測システムの開発 —航空機 Lidar によるカラマツ林の樹冠計測と材積・ 炭素重量計測精度の検証—

米 康充^{*1,*2}・小熊宏之^{*1}・山形与志樹^{*1}

Development of Measurement System for the Carbon Sinks under the Kyoto Protocol
—Measurement of Stem Volume and Carbon Weight of *Larix leptolepis* Stand by Airborne Lidar—

Yasumichi YONE^{*1,*2}, Hiroyuki OGUMA^{*1} and Yoshiki YAMAGATA^{*1}

Abstract

To develop a monitoring system for carbon sinks under the Kyoto Protocol, a method of forest stand measurement using Airborne Lidar sensor is examined. A canopy DSM (Digital Surface Model) was constructed from first pulse of the lidar data, and the DTM (Digital Terrain Model) was constructed from the last pulse of the lidar data. The tree height surface was made from the difference of the canopy DSM and DTM. Crowns of trees were extracted from the tree height surface by the Watershed method. Numbers of stand trees were counted from the crowns. Tree heights were measured from height surface within the crown. Stem volumes of trees were calculated from the relationship between tree height and stem volume, from a yield-density effect curve, and from an aerial photographical analysis table. Carbon weights were calculated by using the relationship between the stem volumes and dry weights and the coefficient of carbon inclusion.

The results are : 1) The measurement error of tree height of *Larix leptolepis* stand was less than about 0.3 m (accuracy) and 1.0 m (precision). The precision of the measurement was assumed to be originated from the precision of truth data ; 2) the extracted crowns of trees were canopy trees, not understory trees, and the number of extracted crown had a tendency to be underestimated ; 3) stem volumes and carbon weights were underestimated by using the relationship between the tree heights and stem volumes and the yield-density effect curve. Using aerial photographical analysis table, however, yielded better results.

The next steps of this study will be 1) to develop of a method of the extraction technique from the lidar points with more accuracies, and 2) to develop of a method of aerial photographical analysis to estimate carbon weights for wide areas.

Keywords : airborne Lidar, forest measurement, biomass, carbon sink, the Kyoto Protocol

1. はじめに

1997年、気候変動枠組み条約第3回締約国会議(COP3)では、温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された。削減目標には吸収源の算入が認められているが、このような吸収源を算入するにあたっての課題として挙げられるのは、モニタリングやインベントリー評価体制の構築である。議定書では排出・吸収量を推計するための

国内制度を2007年までに整備しなければならないこと、排出・吸収インベントリーに京都議定書を遵守したことを明らかにする情報を含めなくてはいけないこと、専門家審査チームがインベントリー情報をレビューすることが盛り込まれている¹⁾。このような状況の中、炭素吸収量がクレジットとして認められる可能性があることや、専門家審査チームのレビューに適応する必要があることなどから、吸収源モニタリングシステムを構築し、排出・吸収源インベントリーを詳細に精度良く整備・評価していく必要がある

(2002. 3. 13 受付, 2002. 10. 21 改訂受理)

*1 国立環境研究所地球環境研究センター
〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2
*2 株式会社パスコ
〒153-0043 東京都目黒区東山 1-1-2

*1 Center for Global Environmental Research, National Institute of Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan

*2 PASCO Corporation, 1-1-2 Higashiyama, Meguro, Tokyo 153-0043, Japan

る。ここで吸収量評価手法に不確実性がある場合、セーフサイドまで割り引く²⁾ ことになっている。このことから、吸収量が最大限評価されるためには、精度よく評価を行う手法を開発する必要がある。ただし、吸収量を精度よく評価できたとしても、そこで得られた吸収量の価値以上に評価・整備にコストがかかれば精度を向上させる意味がない。よって開発する手法には精度と共に低コスト化が必要となる。山形ら³⁾ はそのような方法としてリモートセンシングの計測手法の役割を論じている。中でも航空機 Lidar は、高精度で樹高が計測できることが期待される^{4),5)}。国内の森林においても航空機 Lidar を用いた森林計測の研究が行われている^{6),7)}。この研究では樹冠率、樹冠面高分布の計測・評価は行われているが、吸収源を評価する際に重要な因子となる樹高・材積・炭素重量等についての評価は行われていなかった。また航空機 Lidar をもちいて樹高・材積について評価した事例⁸⁾ もあるが、パルス密度が約 0.32 m の高密度で計測したものであり、この条件で広域計測を行うためには、狭い計測幅を補うため飛行回数を増やし、大量のデータ処理する必要がある。これはすなわち、計測コストの上昇を意味する。広域計測を行うためには、計測精度を保ちつつデータ量を減らす工夫が必要である。そこで、本研究では Airborne および Heliborne Lidar により、

樹高・材積・炭素重量を計測・推定するとともに、フットプリントサイズや・パルス密度を変えた場合の計測値の精度変化についての検討を行うこととした。

また、航空機 Lidar による計測そのものは近年発展した手法であるが、上空から樹高や樹冠を計測する点では、航空写真判読と同様である。航空写真判読結果より材積を推定する方法^{9)~12)} は従来より行われているが、これらの成果が利用できるならば、多くの労力が必要な材積表調製の作業を減らすことができる。そこで本研究ではそのような方法の一つである、空中写真林分材積表¹³⁾ の利用も併せて検討を行うこととした。

2. 調査地概要および計測条件

2.1 調査地概要

調査地は、苫小牧市内にある国有林苫小牧 197 林班・198 林班の 2 地区を対象とした。調査にあたっては、197 林班には 300 m×100 m のプロット（以降、Plot A）、198 林班には 100 m×70 m のプロット（以降、Plot B）を設定し毎木調査を行った（Fig. 1 (1)）。調査区内の胸高直径（DBH；地上高 1.3 m 位置での立木直径）5 cm 以上の立木に対し、胸高直径（Fig. 1 (2)）・立木位置の測定を行った。さらに、

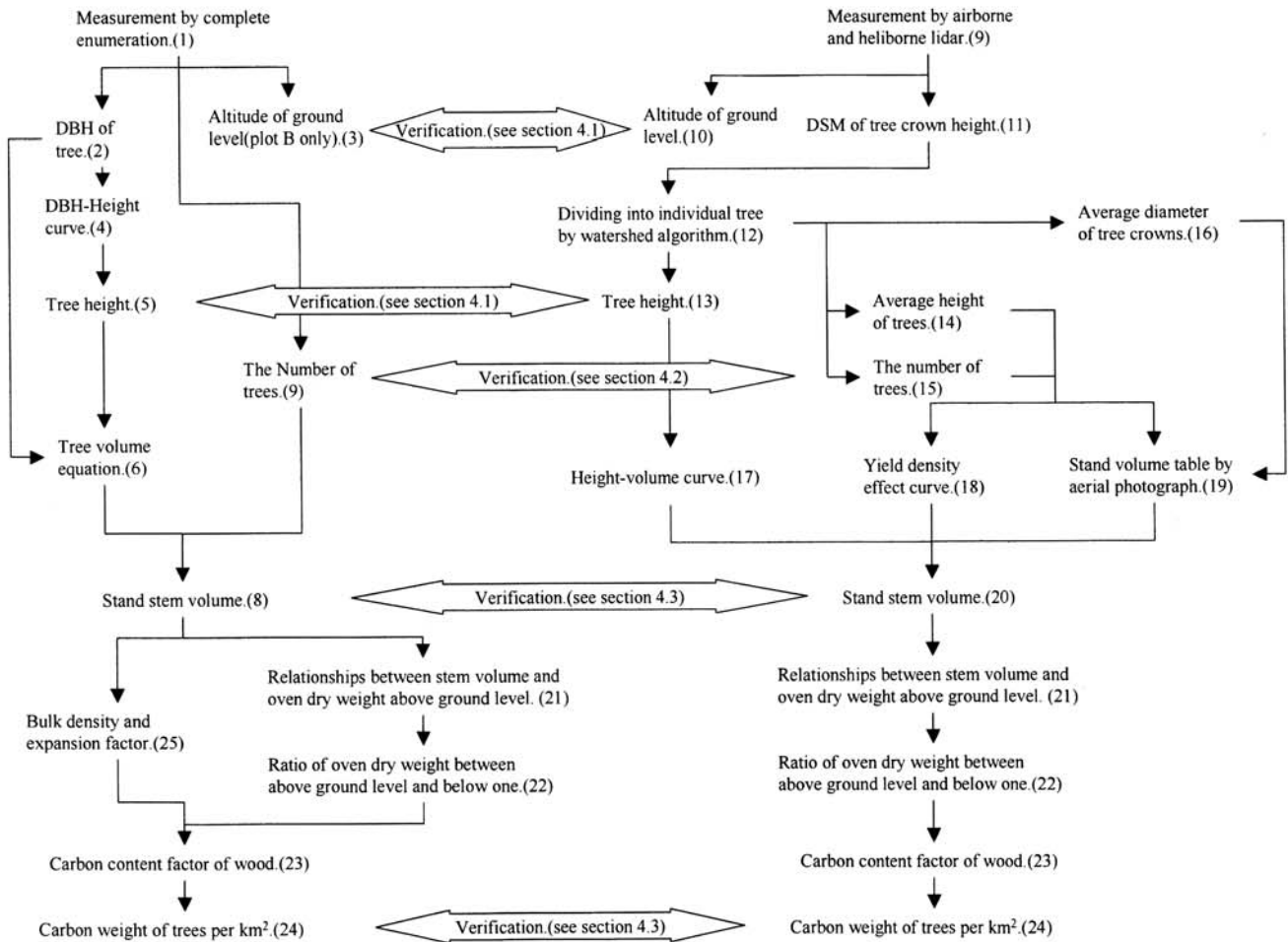


Fig. 1 Flowchart of estimating carbon weight using DSM data measured by airborne and heliborne lidar.

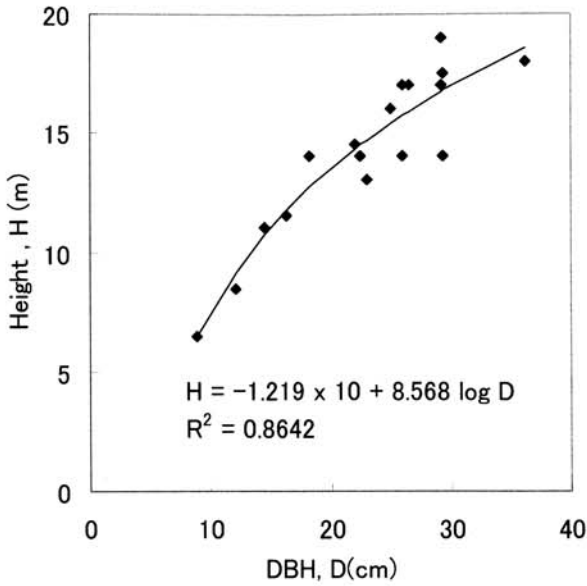


Fig. 2 Diameter-Height curve for coniferous tree in Plot A.

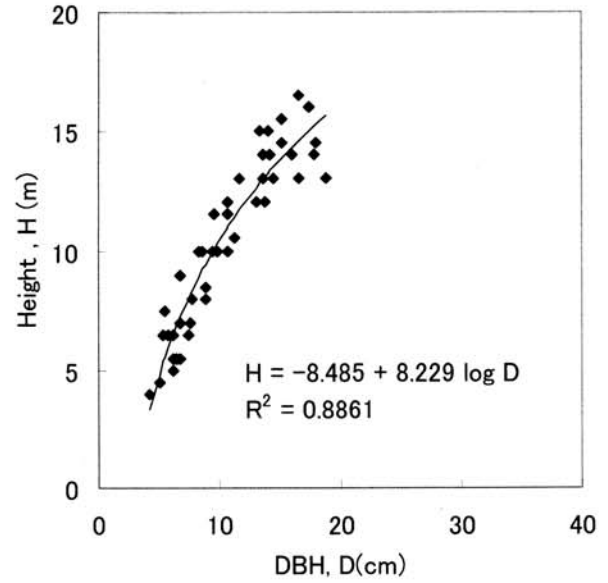


Fig. 4 Diameter-Height curve for Broad-leaved tree.

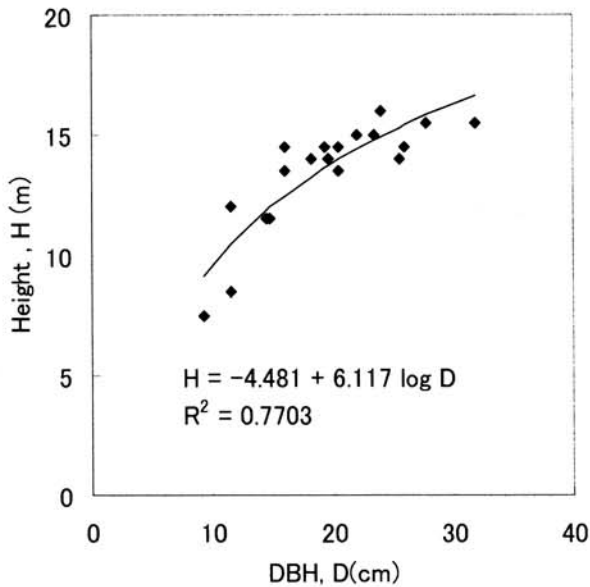


Fig. 3 Diameter-Height curve for coniferous tree in Plot B.

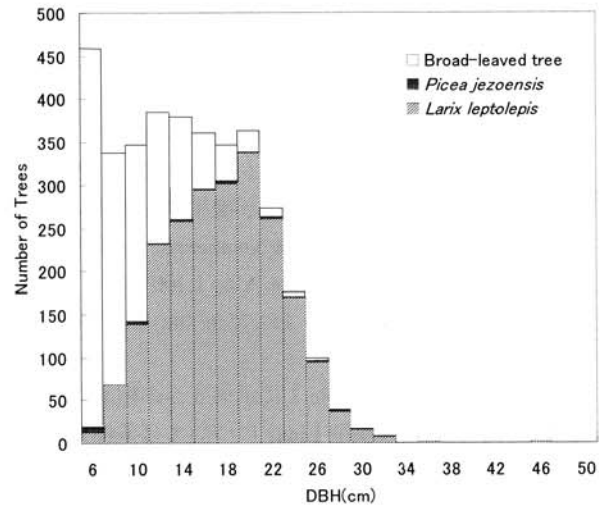


Fig. 5 Histogram of total number of trees in Plot A.

Plot B においては各立木の根本標高を計測した (Fig. 1 (3))。胸高直径の測定は輪尺を用い、2 cm 活約にて測定を行った。また、プロットの4隅には木杭を設け、国有林境界標石および4等三角点よりトータルステーション (Nikon フィールドステーション GF-1) を用い多角測量にて座標・標高を決定した。立木の胸高位置の座標および標高については、木杭を基準にしトータルステーション・プリズムを用いて測定した。また、測定した座標から標高につき 1.3 m 減算した場所を立木の根本標高とした。樹高については、各径級の代表木を測定し、樹高曲線式 (Fig. 1 (4), 2, 3, 4) を作成して全木にあてはめることにより求めた (Fig. 1 (5))。また、立木幹材積 (Fig. 1 (8)) は胸高直径・樹高より幹材積表編成式 (Fig. 1 (6)) を用いて求め

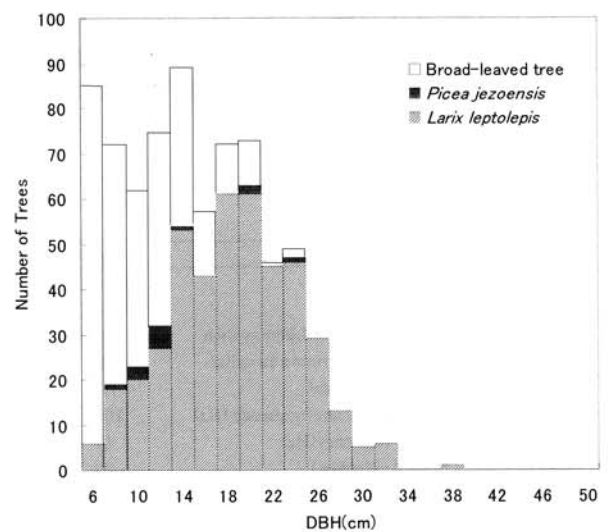


Fig. 6 Histogram of total number of trees in Plot B.

た。カラマツについては北海道立木幹材積表¹⁴⁾ 編成式を用い、エゾマツ・広葉樹については立木幹材積表¹⁵⁾ 編成式を用いた。

(カラマツ)

$$\begin{aligned} F1 &= 0.435719 + 0.515867/H + 2.481278/H^2 \\ F2 &= 0.439004 + 0.916461/D - 0.073809/D^2 \\ V &= \pi (D/200)^2 \times H \times (F1 + F2) / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

(エゾマツ)

$$V = 10^{(-4.0744 + 1.824080 \log D + 0.934568 \log H)} \times 1.0048 \quad (2)$$

(広葉樹)

$$V = 10^{(-4.068644 + 1.756152 \log D + 0.906210 \log H)} \quad (D < 12)$$

$$V = 10^{(-4.335395 + 1.903051 \log D + 1.025410 \log H)} \quad (12 \leq D < 22)$$

$$V = 10^{(-4.332596 + 1.853014 \log D + 1.166956 \log H)} \quad (22 \leq D < 30)$$

(3)

V : 立木幹材積 (m³) D : 胸高直径 (cm)

H : 樹高 (m)

林地は 1957 年 (Plot A)・1958 年 (Plot B) に植栽されたカラマツ (*Larix leptolepis* Gordon) 人工林で、ほかにエゾマツ (*Picea jezoensis* Carr.), 広葉樹が侵入している (Fig. 5, 6)。林床はオシダ (*Dryopteris crassirhizoma* Nakai), シネワラビ (*Dryopteris expansa*) などのシダ植物に、低木のフッキソウ (*Pachysandra terminalis*) が混生する植物によって占められ、一部クマイザサ (*Sasa senanensis*) が優占している。ha 当たり本数・材積は、Plot A が 1,200 本/ha・148.92 m³/ha, Plot B が 1,010 本/ha・152.77 m³/ha であった。

2.2 Lidar 計測

Lidar による計測は、Table 1 に示す 5 つの観測を行った (Fig. 1 (9))。航空機搭載型 Lidar については条件の違いによる精度の差異を検証するために、パルス密度を変えた観測 (Obs. O と, Obs. A6), および飛行高度を変えた観測 (Obs. A4, Obs. A6, Obs. A8) を行った。また、航空機搭載型 Lidar とヘリコプター搭載型 Lidar との比較を行うため、ヘリコプターによる観測 (Obs. H) を行った。なお、本稿では航空機搭載型・ヘリコプター搭載型 Lidar を合わせて航空機 Lidar と記載し、双方を区別する場合は、エアボーン Lidar・ヘリボーン Lidar と記載することとする。

3. 方 法

3.1 Lidar データの解析

航空機 Lidar により観測されたデータは、レーザ反射位置の 3 次元座標として取得される。この点群中、Last Pulse より取得されたデータから、立木等のノイズを除去したものを地盤データとし 0.33 m Grid の DTM データを作成した (Fig. 1 (10))。また、First Pulse より取得されたデータは、樹冠上部の標高であると考え、0.33 m Grid の樹冠上面の DSM を作成した。さらに、樹冠上面の DSM から、DTM を引くことで、推定樹冠高メッシュデータを作成した¹⁶⁾ (Fig. 1 (11))。

3.2 樹冠の抽出および樹冠直径・樹高の計測

航空機 Lidar により得られた、推定樹冠高メッシュデータから、Watershed アルゴリズムを用い樹冠の抽出を行った¹⁷⁾ (Fig. 1 (12))。Watershed アルゴリズムは以下の流れで実行される。

- (1) 樹高値勾配の極大値にマーカを設定する。
- (2) 樹高値勾配に沿ってマーカを成長させる。
- (3) 隣接する樹冠のマーカとぶつかったところまたは、樹高値勾配が閾値以下になった箇所に境界を生成する。

Watershed アルゴリズムにより生成された樹冠の領域をポリゴン化、樹冠ポリゴンとし、樹冠梢端標高・推定樹冠高・樹冠直径を計測した。XY 平面上で樹冠ポリゴンに含まれる First Pulse の点群の中でもっとも Z 座標 (標高) 値の高いものを樹冠梢端標高とし、その標高から DTM 標高を引いた値を推定樹冠高とした (Fig. 1 (13))。また、推定樹冠高・抽出本数から各 Plot 毎の平均樹冠高 (Fig. 1 (14)) と ha 当たり本数 (Fig. 1 (14)) を算出した。樹冠直径は抽出した形状を楕円で近似し、その長径と短径の平均値を用い、この値を用いて各 Plot 毎の平均樹冠直径 (Fig. 1 (16)) を算出した。

3.3 精度の検証

計測された DTM および推定樹冠高の精度を検証するため、毎木調査データと比較・検証を行った。DTM については、毎木調査により計測した根本標高と、その XY 座標と同じ位置の DTM 標高を比較した。樹高については、樹

Table 1 Flight Dara.

Observation Name	Obs.O	Obs.A4	Obs.A6	Obs.A8	Obs.H
Carrier aircraft	Airborne	Airborne	Airborne	Airborne	Heliborne
Observed Date	9-10-Dec-1999	12-Aug-2000	12-Aug-2000	12-Aug-2000	26-Sep-2001
Model No. of the Lidar system	ALTM1020	ALTM1020	ALTM1020	ALTM1020	ALTM1225
Height from Ground Level(m)	600	400	600	800	200-300
Flight speed(km)	180	180	180	180	50
Pulse repetition frequency (Hz)	5000	5000	5000	5000	25000
Scan Frequency(Hz)	17	26	23	23	25
Scan Angle(deg.)	20	15	10	8	20
Pulse Density(m)	1.44	1.10	0.96	1.03	0.14-0.21
Beam divergence(mrad)	0.3	0.3	0.3	0.3	1.2,0.25
Footprint Size(m)	0.18	0.12	0.18	0.24	0.05-0.36

冠ポリゴンと毎木調査の立木位置データを以下の手順で対応付けを行った。

- (1) 樹冠ポリゴンについて重心の XY 座標を求め、これに推定樹冠高を Z 座標とした点を作成する。
- (2) 立木位置を XY 座標とし、これに樹高を Z 座標とした点を作成する。
- (3) 上記 (1), (2) で作成した点の中で、再近傍のペアを作り、それぞれを対応する樹冠ポリゴンと立木のペアとした。

ペアとなった樹冠ポリゴン・立木データについて、樹冠梢端標高および推定樹高について比較・検討を行った。

3.4 材積・炭素重量推定精度の検討

バイオマス推定にあたっては、まず材積を求めその後、炭素重量に変換することによりおこなった。これは、広く整備され森林管理において一般に利用される既存の資料(材積表・密度管理図・航空写真林分材積表等)は材積が目的または要因となっているため、材積を用いれば、これらの情報を用いることができるためである。

Lidar 計測値から材積を推定するにあたっては、樹高一材積の関係式を用いる方法 (Fig. 1 (17)), 人工林密度管理図⁸⁾を用いる方法 (Fig. 1 (18)), 空中写真林分材積表を用いる方法 (Fig. 1 (19)) の 3 つの手法により求め、それぞれの値について比較検討を行った。なお、Lidar 計測値から樹種の判別は困難なため、計測値はすべて調査地の優占種であるカラマツと仮定した。

樹高-材積の関係式 (Fig. 1 (17)) は、樹高曲線式 (Fig. 2, 3) および、式 (1) より作成し材積を求めた (Fig. 1 (20))。

人工林密度管理図は、同齢・単純・単層林の密度管理を行うために作成されたグラフであり、ha あたり幹材積と本数の関係を、等平均樹高曲線・等平均直径曲線・等収量比数曲線・自然枯死線により関連づけている。本研究においては、北海道地方カラマツ林分密度管理図を用い、この

中の収量密度効果線の逆算式 (Fig. 1 (18)) を用いて林分幹材積を求めた (Fig. 1 (20))。

$$V = (0.0651368H^{-1.230184} + 9492.9H^{-2.948559}/N)^{-1} \quad (4)$$

V : ha あたり材積 H : 上層木の平均樹高
N : ha あたり本数

空中写真林分材積表は、空中写真から樹高・樹冠直径・本数・地形・方位・傾斜などを因子として、林分材積を求める材積表である。材積表には各因子カテゴリーのスコア値が記載されており、因子ごとのスコア値を加算することで材積を求めるものである。本研究では札幌営林局のとりまとめたカラマツ人工林の空中写真林分材積表¹⁹⁾を使用 (Fig. 1 (19)) し、林分幹材積を求めた (Fig. 1 (20))。Table 2 に使用した空中写真林分材積表のアイテムと材積推定に対する寄与率を示す。

材積から炭素重量を推定するために、Plot A と同じ 197 林班に植栽されたカラマツから 10 本を直径階別に選定伐採し、幹・枝・葉の全乾重量を測定した結果をもとに材積-全乾重量 (幹・枝・葉) の関係式を作成した (Fig. 7) (Fig. 1 (21))。また、根を含む全乾重量の推定には松本らの推定方法に従い²⁰⁾、針葉樹の部位別割合 (幹 : 枝 : 葉 : 根) 60 : 8 : 12 : 20 を用い、全乾重量 (幹・枝・葉) に 1.25 を乗じることで求めた (Fig. 1 (22))。さらに、炭素含有係数 0.50 (tC/t) (Fig. 1 (23)) を用いて炭素重量への変換を行った (Fig. 1 (24))。

毎木調査結果の炭素重量への変換にあたっては、カラマツについては先の変換式 (Fig. 1 (21)~(24)) を用い、エゾマツ・広葉樹についてはカラマツに比べて調査地の総バイオマス量が少ないことから、容積密度の平均値・拡大係数²¹⁾を用い次式で変換を行った (Fig. 1 (25))。

$$Wc = \rho_o \times V \times E \times C \quad (5)$$

Wc : 炭素重量 (tC)

Table 2 Volume table for aerial photogrammetrical analysis.

Items		R ²
Tree height		0.69
Tree height	Number of canopy trees	0.76
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown	0.78
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age	0.89
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index	0.90
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index Slope angle	0.90
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index Slope angle Soil type	0.91
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index Slope angle Soil type Altitude	0.92
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index Slope angle Soil type Altitude Surface texture	0.94
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index Slope angle Soil type Altitude Surface texture Beaming	0.96
Tree height	Number of canopy trees Diameter of tree crown Forest Age Warm index Slope angle Soil type Altitude Surface texture Beaming Canopy density	0.96

ρ_o : 容積密度 (t/m^3 , エゾマツ: 0.314, 落葉広葉樹: 0.47)
 V: 幹材積 (m^3)
 E: 拡大係数 (エゾマツ: 1.7, 落葉広葉樹: 1.8)
 C: 炭素含有係数 (tC/t : 0.5)

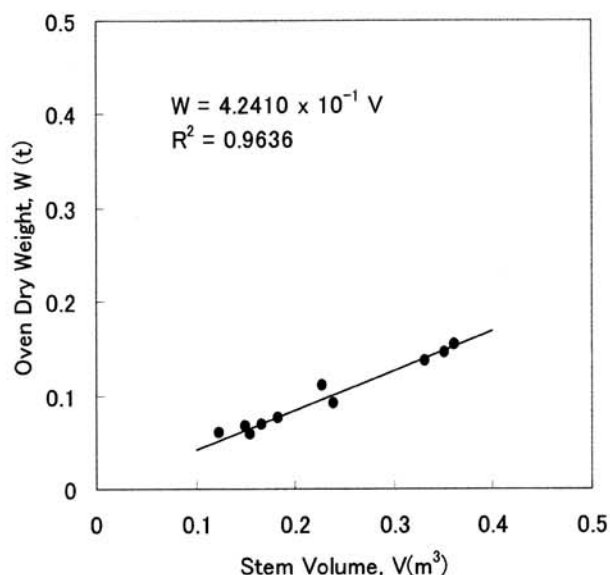


Fig. 7 Relationships between stem volume and oven dry weight.

4. 結果と考察

4.1 地上高・樹高計測精度の検討

Plate 1 は, Plot B およびその周辺において, ヘリボーン Lidar (Obs. H) 観測により作成された樹冠面の DSM ならびに地表面の DTM を鳥瞰図として表したものである。樹冠面の DSM は樹冠の上面をとらえており, 所々に存在する林冠ギャップもとらえていることがわかる。Plate 中央部の突出部分はフラックス観測用 25 m のタワーである。Plate 2 は, Plate 1 と同範囲の樹冠面 DSM ならびに, Watershed アルゴリズムにより求められた樹冠ポリゴンである。

地上標高のトゥルースの計測を行っている Plot B における地上標高の計測誤差の結果を Table 3 に示す。これによると, 地上標高計測の RMS 誤差はおおよそ 30 cm~80 cm, 系統誤差 (誤差平均) はおおよそ 20 cm~70 cm, 偶然誤差 (誤差平均の標準偏差) はおおよそ 30 cm であった。次に Plot A, B における樹高の計測誤差の結果を Table 4 に示す。樹高計測の RMS 誤差はおおよそ 90 cm, 系統誤差はおおよそ 10 cm であるが, Plot A の Obs. H のみ 27 cm であり, 有意な差が見られた。Obs. H の計測は現地調査から 1 年 6 ヶ月後であり, この間の樹高成長が影響していると考えられる。偶然誤差はおおよそ 90 cm であった。

系統誤差について, 地上標高は大きな差を示している

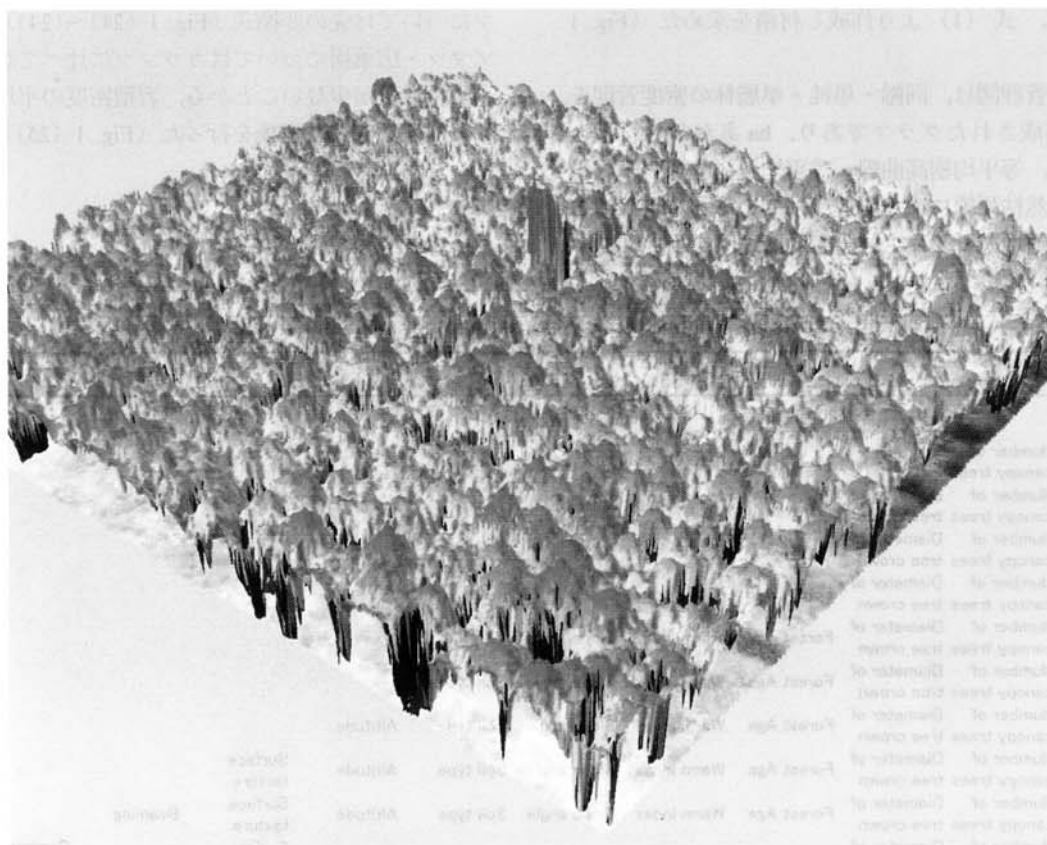


Plate 1 3D View of Canopy DSM and DTM around Plot B.

が、樹高は比較的良好な値を示している。本研究における航空機 Lidar による樹高の計測は、林冠梢端標高から地上標高を引くことで求めている。地上標高の系統誤差が大きな値を示すにもかかわらず、Lidar 計測値の差分である樹高の系統誤差が小さな値を示している。これは、林冠梢端標

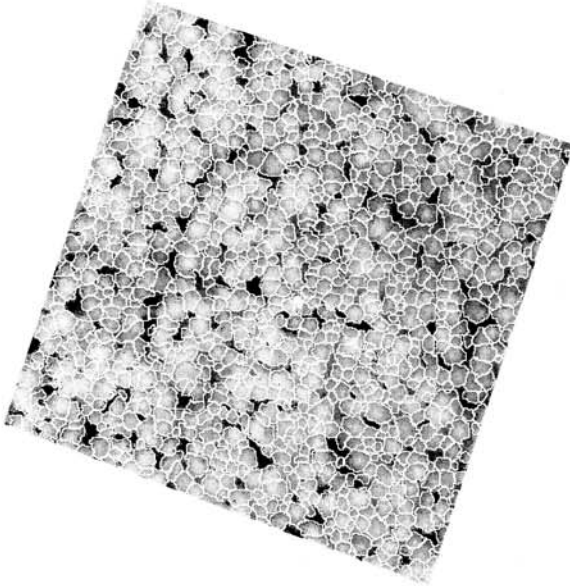


Plate 2 Canopy DSM and crown polygons around Plot B.

高・地上標高それぞれの値に同じ系統誤差がかかっているためと考えられる。航空機 Lidar による絶対座標の計測値の精度は、30 cm 程度とされるが、本結果はこれよりも大きな値となった。この原因としては、① グランドトゥルースの標高計測誤差、② Obs. A6 と Obs. A8 の誤差平均の差が 50 cm もあることから、GPS/IMU の状態による系統的な誤差の可能性が考えられる。より正確な標高値が必要な場合は、基準点・明瞭な地物による刺針が必要と考えられる。

地上標高の偶然誤差は 30 cm 前後であった。これは Lidar そのものの計測精度が 15 cm であることや、地表面に到達するレーザポイントが離散的であり補間した値と比較していること、本 Plot の林床には、シダやササが存在し、細かな凹凸が存在することを考慮に入れると、良好な結果を示していると考えられる。一方、樹高の偶然誤差は、90 cm 前後と大きな値を示した。樹冠上面標高の航空機 Lidar による計測は地上標高計測より測点数が多く計測条件としてはよいことから、地上標高精度より悪くなることは考えにくい。よって、航空機 Lidar の計測誤差以外の要因が考えられる。樹高の計測誤差について研究を行った梶原²²⁾によると、標本抽出にもとづく樹高曲線の誤差は最大 ±2 m であったとしている。本 Plot のトゥルースの樹高は、実測によるものではなく、標本抽出・樹高曲線に基づくものであるため、この樹高曲線による誤差が累積しているものと考えられる。

Table 3 Difference error between ground measured altitude and lidar-derived ground altitude.

Plot Name	Observation Name	Obs.O	Obs.A4	Obs.A6	Obs.A8	Obs.H
Plot B	RMS error	0.513	0.720	0.783	0.369	0.575
	Average error(m)	0.439	0.658	0.727	0.240	0.484
	S.D. of average error(m)	0.267	0.296	0.296	0.304	0.315

Table 4 Difference error between ground measured tree height and lidar-derived tree height.

Plot Name	Observation Name	Obs.O	Obs.A4	Obs.A6	Obs.A8	Obs.H
Plot A	RMS error	0.91	0.93	0.92	0.92	0.94
	Average error(m)	0.11	0.11	0.11	0.13	0.27**
	S.D. of average error(m)	0.90	0.92	0.91	0.91	0.90
Plot B	RMS error	0.89	0.92	0.87	0.86	0.87
	Average error(m)	-0.09	-0.05	-0.05	0.01	0.06
	S.D. of average error(m)	0.88	0.92	0.87	0.86	0.87

Significance according to ANOVA : ** P<0.01

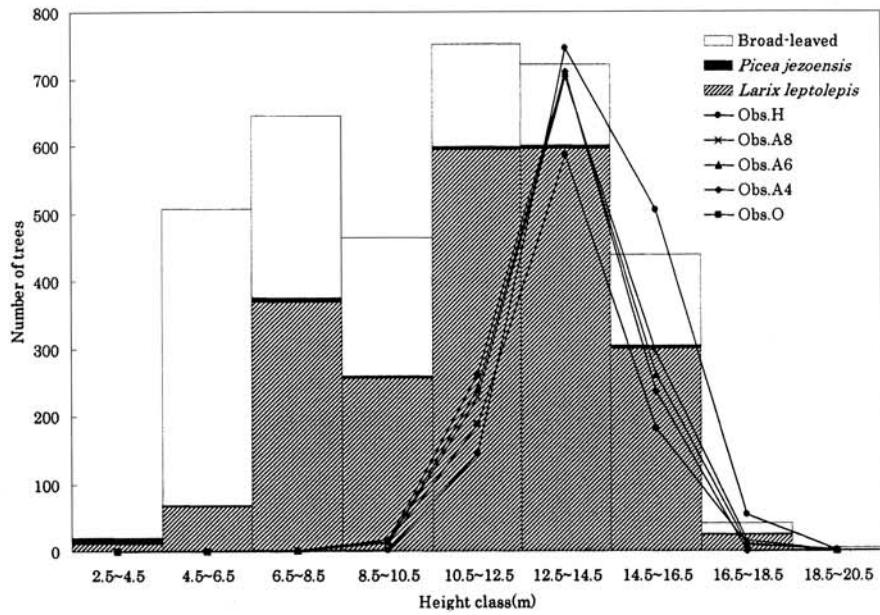


Fig. 8 Histogram of total number of trees by height class. in Plot A.

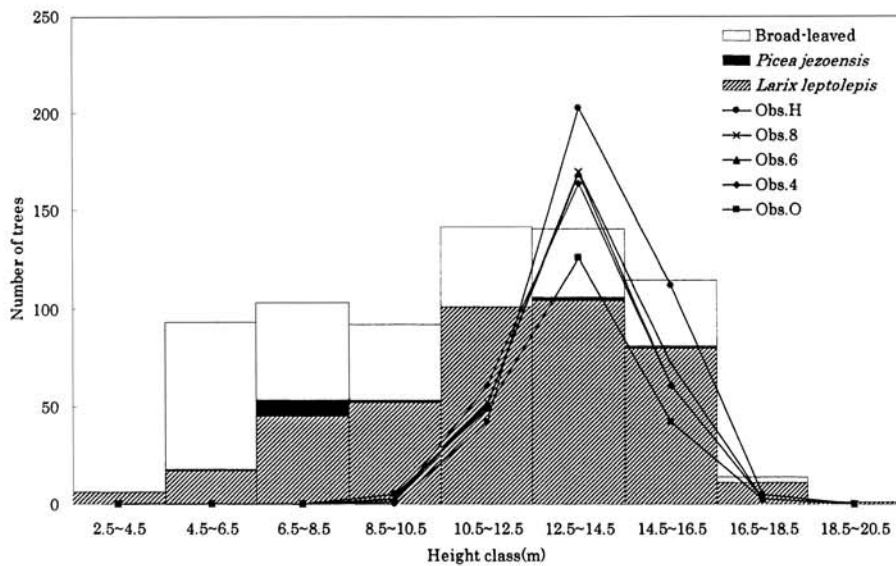


Fig. 9 Histogram of total number of trees by height class. in Plot B.

本研究の結果より、航空機 Lidar システムによる高さ計測誤差は、絶対座標については平均数十 cm の系統誤差があるものの、樹冠梢端高から地上高の差分である樹高については、ほぼ正確な平均値を得る事ができた。また偶然誤差についてもツールの測定精度以内に納まれていると考えられた。これはパルス密度・撮影高度・エアボーン Lidar・ヘリボーン Lidar にかかわらず同様の傾向を示した。このことより本手法は、カラマツ人工林の樹高計測について、パルス密度 1.4 m 以下、フットプリントサイズ 0.05~0.24 m 程度であれば、林分としての樹高の測定には有効な方法であると考えられた。

4.2 本数計測精度の検証

Fig. 8, 9, Table 5 に Plot A および Plot B における樹高階

別のツールの本数および、Lidar および Watershed 法による計測本数を示した。これらによると、ツールの樹高階別本数のグラフは、11~14 m および 7~8 m 付近にピークを持つ 2 つ山の形をしており、林地は 11 m 以上の上層木とそれ以下の下層木で構成されていることがわかる。これに対して航空機 Lidar 計測結果は 13~14 m 付近にピークを持つ 1 つ山の形をしており、林地の上層木の中でも上部のみが計測されていることがわかる。

次に、本数計測精度について、Obs. H の上層木以外は実際の本数よりかなり少ない結果となった。これは、下層木が抽出取得できていなかったこと、上層木の中でも樹高の低い立木が取得できていなかったことによる。下層木が取得できない原因は、樹冠の DSM を作成する時に樹冠の上

Table 5 Number of trees.

Plot Name	Observation Name	Number of trees			
		All	%	Canopy layer*	%
Plot A	Truth	3599		1689	
	Obs.O	986	27%	949	56%
	Obs.A4	1230	34%	1205	71%
	Obs.A6	1237	34%	1207	71%
	Obs.A8	1257	35%	1232	73%
	Obs.H	1455	40%	1445	86%
Plot B	Truth	707		271	
	Obs.O	224	32%	170	63%
	Obs.A4	290	41%	228	84%
	Obs.A6	286	40%	233	86%
	Obs.A8	300	42%	245	90%
	Obs.H	362	51%	320	118%

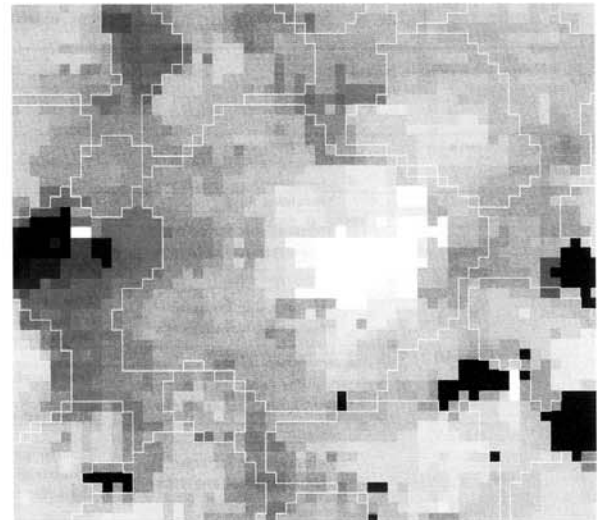
*Tree Height ≥ 11 

Plate 3 An example of extraction error.

Table 6 Stem volume and Carbon weight estimated by relationship between height and stem volume.

Plot Name	Observation Name	Stem volume (m ³ /ha)				Carbon weight (Ct / km ²)			
		All	%	Canopy layer*	%	All	%	Canopy layer*	%
Plot A	Truth	148.92		125.81		4243		3474	
	Obs.O	73.09	49%	72.05	57%	1937	46%	1910	55%
	Obs.A4	90.89	61%	89.94	71%	2409	57%	2384	69%
	Obs.A6	92.55	62%	91.76	73%	2453	58%	2432	70%
	Obs.A8	96.53	65%	95.86	76%	2559	60%	2541	73%
	Obs.H	130.03	87%	129.74	103%	3446	81%	3439	99%
Plot B	Truth	152.77		142.50		4453		4097	
	Obs.O	67.87	44%	66.88	47%	1799	40%	1773	43%
	Obs.A4	91.77	60%	91.41	64%	2432	55%	2423	59%
	Obs.A6	91.37	60%	90.38	63%	2422	54%	2396	58%
	Obs.A8	97.03	64%	96.31	68%	2572	58%	2553	62%
	Obs.H	116.41	76%	116.15	82%	3086	69%	3079	75%

*Tree Height ≥ 11

Table 7 Stem volume and Carbon weight estimated by yield-density effect curve.

Plot Name	Observation Name	Measured data		Stem volume (m ³ /ha)				Carbon weight (Ct / km ²)			
		Average height of canopy trees	Number of canopy	All	%	Canopy layer*	%	All	%	Canopy layer*	%
Plot A	Truth	13.44	563.00	148.92		125.81		4243		3474	
	Obs.O	13.61	316.33	61.64	41%	61.64	49%	1634	39%	1634	47%
	Obs.A4	13.55	401.67	74.10	50%	74.10	59%	1964	46%	1964	57%
	Obs.A6	13.61	402.33	75.09	50%	75.09	60%	1990	47%	1990	57%
	Obs.A8	13.69	410.67	77.44	52%	77.44	62%	2053	48%	2053	59%
	Obs.H	14.16	481.67	95.72	64%	95.72	76%	2537	60%	2537	73%
Plot B	Truth	13.70	665.71	152.77		142.50		4453		4097	
	Obs.O	13.50	307.14	58.75	38%	58.75	41%	1557	35%	1557	38%
	Obs.A4	13.56	410.00	75.43	49%	75.43	53%	1999	45%	1999	49%
	Obs.A6	13.64	397.14	74.69	49%	74.69	52%	1980	44%	1980	48%
	Obs.A8	13.66	420.00	78.39	51%	78.39	55%	2078	47%	2078	51%
	Obs.H	13.93	465.71	89.46	59%	89.46	63%	2371	53%	2371	58%

*Tree Height ≥ 11

Table 8 Stem volume and Carbon weight estimated by aerial photogrammetrical analysis table.

Plot Name	Observation Name	Method of estimation	Average height	Number of	Diameter of	Stem	Carbon	
			of canopy trees	canopy trees	tree crown	Volume	weight	
			(m)		(m)	(%)	(tC/km ²) (%)	
			Score	Score	Score			
Plot A	Truth	Measured data	13.44	563.00		148.92	4243	
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	89%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	83.9420	147.58	99%	3912 92%	
	Obs. O	Measured data	13.61	316.33	5.38			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	89%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	87%	3449 81%	
	Obs. A4	Measured data	13.55	401.67	4.76			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	89%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	87%	3449 81%	
	Obs. A6	Measured data	13.61	402.33	4.76			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	89%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	87%	3449 81%	
	Obs. A6	Measured data	13.66	414.33	4.67			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	89%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	87%	3449 81%	
	Obs. H	Measured data	14.16	481.67	4.23			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	89%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	87%	3449 81%	
Plot B	Truth	Measured data	13.70	665.71	152.77	4453		
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	87%	3523 83%
		Number of Canopy Trees	63.6339	83.9420	147.58	97%	3912 92%	
	Obs. O	Measured data	13.50	307.14	5.44			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	87%	3523 79%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	85%	3449 77%	
	Obs. A4	Measured data	13.56	410.00	4.64			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	87%	3523 79%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	85%	3449 77%	
	Obs. A6	Measured data	13.64	397.14	4.74			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	87%	3523 79%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	85%	3449 77%	
	Obs. A8	Measured data	13.66	420.00	4.48			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	87%	3523 79%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	85%	3449 77%	
	Obs. H	Measured data	13.93	465.71	4.31			
		Volume table for aero-photogrammetrical analysys	Tree Height	132.9000		132.90	87%	3523 79%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705	130.10	85%	3449 77%	

面高データを用いて作成したため、下層木で反射したものとされる点群も排除したことや、First Pulse・Last Pulseのみの取得であったため中間の点群の取得数が少なかったことによると思われる。また、上層木の一部が抽出されていないことについて、Watershed法により抽出した結果を観察すると、円が複数合体した樹冠形状が見られた(Plate 3)。上層木の中でも樹高の低い立木が、樹高の高い立木と合体して1つの樹冠として抽出されたものと考えられる。スギ林の空中写真・イコノス画像の輝度値に対してWatershed法を用いて樹冠抽出を行った児島⁸⁾によると、スギ林ではWatershed手法は有効であったとしているが、空中写真を判読する際の樹種判定基準¹⁰⁾によると、スギの樹冠形状は「円錐形で頂部はとがり明瞭」なのに対して、カラマツは「円錐形で頂部消失しやすく明瞭でない」とされている。本調査地のカラマツ林では、樹冠梢端部が明瞭ではないため複数の樹冠が分離されなかったものと考えられる。一方、計測方法による差異は、Obs. O・Obs A4~A6・Obs. Hの間では抽出された本数の差が大きかったが、Obs A4・A6・A8の間では小さかった。Watershedでは、DSM面上の微細な起伏の変化が結果に影響するが、サンプリングの密度を低くするとこの起伏の情報が失われることか

ら、本手法による樹冠抽出結果および本数計測結果にはパルス密度の違いが影響しており、密度を高くするほど捕捉率が上がる傾向があった。

4.3 材積・炭素重量推定精度の検討

Table 6にはPlot AおよびPlot Bにおけるトゥルースおよび樹高-材積式により算出した全木の材積・炭素重量、および樹高11m以上の上層木のみ抽出した材積・炭素重量を示した。これらによると、材積・炭素重量の推定結果には幅があり、計測方法によっておおよそ44%~87%となり、そのほとんどが過小に評価される傾向があった。先の児島⁸⁾によると、1つの樹冠が複数に分離される、あるいは複数の樹冠が1つの樹冠として抽出する場合があります、対象とする面積が小さい場合はその影響を受けるが、広いと過大・過小評価が相殺され確からしい精度で抽出が可能であったとしている。本調査地においても、小面積のPlot Bの方が、大面積のPlot Aより過小評価される傾向があった。ところで、この過小評価傾向は航空機Lidarによって下層木が計測されていないことも影響していると考えられる。そこで、樹高11m以上の上層木のみを抽出して比較を行った。これによると結果は数%上昇しているがPlot AのObs. H以外は過小評価される傾向は変わらなかった。

Table 7には収量密度効果線の逆算式による結果および、これを算出するのに必要な、平均上層木高と ha あたり本数を示した。樹高 11 m 以上の平均上層木高誤差は、Plot A の Obs. H を除いて 30 cm 以内であった。Plot A の Obs. H については 70 cm 程度の誤差があった。Obs. H が大きな誤差を示したことについては、計測方法・機器の違い、Obs. H の計測時はトゥルースの調査から 2 年経過しており立木が成長したためとも考えられるが今後の検討課題にしたい。収量密度効果線の逆算式による結果は先の樹高-材積式により算出したものと同様過小評価となった。密度管理図は施業の指針として作成されたものであり、その材積には上層木のみならず下層木も含まれている。本調査では、計測結果に下層木が含まれていないため、下層木の材積が林分材積に計上されないことが原因と考えられる。

Table 8 には、空中写真林分材積表による結果を示す。空中写真林分材積表では推定に用いる因子によって推定値も異なるが Obs. O を除いて、88%~94% と推定値が改善されている。これは、空中写真林分材積表は空中写真の判読値より材積を推定するためのものであるため、空中写真から判読が容易な上層木のパラメータを用いて推定する様、調整されているからと考えられる。

5. ま と め

本研究では First Pulse および Last Pulse による航空機 Lidar 計測と Watershed 法による林冠抽出を行い、以下のことがわかった。

1) カラマツ人工林の樹高計測について、パルス密度 1.4 m 以下、フットプリントサイズ 0.05~0.24 m 程度、林分としての樹高の測定には有効な方法であると考えられた。

2) 抽出された樹冠は主に上層木のものであり、下層木はほとんど抽出されなかった。また、樹冠抽出結果および本数計測結果には、パルス密度の違いが影響していると考えられ、密度を高くするほど捕捉率が上がる傾向があった。

3) 材積・炭素重量推定にあたって、直接計算・収量密度効果線を用いた場合、上層木のみでは過小評価される傾向にあった。しかし、空中写真林分材積表を用いた場合、上層木のみでの計測値でも比較的良好に推定できた。

以上の結果から今後の課題として以下の 2 つの方針が考えられる。

1) 計測手法の精密化

本研究に残された課題としては、①下層木が計測できなかったこと、②上層木が分離しきれなかったことがある。また、樹高の計測精度についてはトゥルースの計測精度と

分離して評価することが困難であった。

下層木の計測については、近年の Lidar 計測技術として 1st Pulse~5th Pulse までを利用する手法があり、これを林地に適用した場合、林冠と地面の中間の構造を取得できる可能性がある⁵⁾。上層木の樹冠分離手法については、Watershed 手法からさらに進めた手法の検討が必要である。また、上記の手法を検証するために、トゥルースの計測にあたっては、①樹高は樹高曲線ではなく実測により行うこと、②抽出した樹冠の精度を評価するため樹冠幅の実測が必要になる。

2) 計測手法の広域化

空中写真林分材積表により、上層木の情報(樹高・上層木本数・樹冠直径)のみでもある程度の精度で材積・炭素重量を推定することができた。これは、因子により下層木を含む林分構造を推定しているためと考えられる。空中写真林分材積表は精度の高い材積推定方法とされているが、因子の数が多いため推定のための調査作業が多くなることや空中写真の判読精度により材積の推定精度が左右される問題があった。この点、本研究による方法により上層木情報は客観的に計測が可能であり、また近年の GIS 技術の発展・地理情報の整備によりその他の因子(標高・方位・傾斜・地質・局所地形・土性)なども容易に抽出できることから、空中写真林分材積表の様な因子情報から材積・炭素重量を推定する考え方がより利用しやすい状況であると考えられる。また過去に空中写真林分材積表を調整する時には、コストや判読の精度から因子・カテゴリ分けの数を減らしていたと考えられるが、今後はこれを増やすことでより精度を高めることができると期待される。

謝辞：エアボーン Lidar データの計測にあたってはアジア航測株式会社に、ヘリボーン Lidar の計測にあたっては朝日航洋株式会社に、樹冠抽出にあたっては株式会社パスコ洲浜智幸氏にご協力いただいた。また、空中写真林分材積表の収集にあたっては、国立環境研究所(現北海道環境科学研究センター)高田雅之氏、株式会社エコニクス油津雄夫氏、森林総合研究所鷹尾元氏、日本林業技術協会渡辺宏氏にご協力いただいた。ここに謝意を表す。

なお、本研究の調査地である国有林苫小牧 197 林班・198 林班(「苫小牧フラックスリサーチサイト」)は、北海道森林管理局と国立環境研究所の共同事業である「北海道における森林生態系の総合的観測研究」の一環として調査・研究・管理が行われている。関係する方々のご協力に謝意を表す。

引用文献

- 1) 山形与志樹, 石井 敦: 京都議定書における吸収源-ボン合意とその政策的含意. 国立環境研究所地球環境研究センター, つくば, 2001.
- 2) 山形与志樹, 山田和人(編): 京都議定書における吸収源プロジェクトに関する国際的動向, 地球環境研究センター, つくば, 2000.
- 3) 山形与志樹, 小熊宏之, 土田 聡, 関根秀真, 六川修一(2001b) 京都議定書で評価される吸収源活動のモニタリングと認証に関わるリモートセンシング計測手法の役割. 日本リモートセンシング学会誌, 21, pp. 43-57, 2001.
- 4) M. A. Lefsky, W. B. Cohen and S. A. Acker: Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests, *Remote Sens. Environ.*, 70, pp. 339-361, 1999.
- 5) 洲浜智幸: LIDAR による森林計測, 森林航測, 193, pp. 7-11, 2001.
- 6) 林 真知, 沼田洋一, 小熊宏之, 山形与志樹: リモートセンシングデータを利用した林分構造の計測. 写真測量とリモートセンシング, 40, pp. 41-46, 2001.
- 7) 鷹尾 元・高橋正義: リモートセンシングとバイオマス計測. 人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価, 森林総合研究所, pp. 1-5, 2000.
- 8) J. Hyppa, O. Kelle, M. Lehtikoinen and M. Inkinen: 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, pp. 969-975, 2001.
- 9) 渡辺定元, 遠矢和己: 北海道天然生林の空中写真材積表調製の一例, 森林航測, 20, pp. 336-339, 1960.
- 10) 大島誠一, 新田季利, 延堂二郎, 前崎武人: 航空林分材積表の調製-北海道道有林における一例-, 森林航測, 33, pp. 14-16, 1962.
- 11) 合沢義孝, 板垣恒夫, 石川善朗, 谷口信一: 航空写真による天然林の蓄積推定: 北大演業務資料, 14, pp. 25-42, 1969.
- 12) 中島 巖, 樋渡幸男, 長谷川訓子, 大貫仁人: 天然林の調査法に関する研究-北海道トムラウシ天然林の調査-, 林業試験場研究報告, 227, pp. 83-239, 1970.
- 13) 渡辺 宏: 最新森林航測テキストブック, 日本林業技術協会, 東京, 1993.
- 14) 中島広吉: 北海道立木幹材積表-メートル法の部-, 林友会北海道支部, 札幌, 1938.
- 15) 林野庁計画課: 立木幹材積表東日本編, 日本林業調査会, 東京, 1970.
- 16) 大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 吉見健司: ヘリコプター搭載の高分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の三次元リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, 20, pp. 34-46, 2000.
- 17) 児島利治: 高解像度衛星を用いた立木本数抽出および材積推定, 水文・水資源学会 2001 年研究発表会要旨集, pp. 234-235, Aug., 2001.
- 18) 林野庁: 人工林林分密度管理図, 日本林業技術協会, 2000.
- 19) 札幌営林局計画課: 空中写真林分材積表説明書(カラマツ人工林), 札幌営林局計画課, 1978.
- 20) 松本光朗, 鹿又秀聡: 林業統計を利用した炭素蓄積量推定手法の改善, 人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価, 天野正博(編), 森林総合研究所, 荳崎, 2000.
- 21) 松本光朗: 日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量, 森林科学, 33, pp. 30-36, 2001.
- 22) 梶原幹弘: 樹高曲線の誤差に関する実験的考察. 京都府立大学農学部演習林報告, 10, pp. 1-14, 1966.

〔著者紹介〕

●米 康充 (ヨネ ヤスミチ)



所属：株式会社パスコ。国立環境研究所共同研究員。1968年5月生。1992年北海道大学農学部林学科卒，1994年同大学大学院農学研究科修士課程専攻修了。天然林林業技術の向上のため，天然林動態・航測・測樹の研究を行う。1998年株式会社パスコ入社。森林管理向けGISの開発に取り組む。2001年からパスコから国立環境研究所へ派遣勤務を命じられる。現在京都議定書に関わるリモートセンシング技術の高精度化研究に従事する。日本リモートセンシング学会，日本林学会，森林施業計画学会，地理情報システム学会等。study@yone.info

●小熊 宏之 (オグマ ヒロユキ)



独立行政法人国立環境研究所地球温暖化プロジェクト炭素吸収源評価研究チーム主任研究員。1965年5月8日生。1989年3月千葉大学園芸学部園芸経済学科卒。博士(工学)。1989年4月宇宙開発事業団入社。1998年退職。同年4月国立環境研究所重点研究支援協力員，1999年4月地球・人間環境フォーラム研究員，同年12月環境庁国内交流研究員を経て2001年5月から現職。京都議定書対応のリモートセンシング研究に従事。1998年日本写真測量学会論文奨励賞。所属学会：リモートセンシング学会。oguma@nies.go.jp

●山形 与志樹 (ヤマガタ ヨシキ)



独立行政法人国立環境研究所地球温暖化プロジェクト炭素吸収源評価研究チーム総合研究官。1961年生。'85年東京大学教養学部卒業，85年農業技術研究所(環境管理部)入所，'91年勧告立環境研究所入所，社会環境システム部主任研究員，'99年地球環境センター研究管理官を経て現職。'98年複雑な生態系モニタリングに関する研究で博士号(学術)取得。現在，京都議定書対応研究プロジェクト課題代表，“Climate Policy”誌編集委員，IGBP/IHDP/WCRPグローバル炭素循環プロジェクト国際推進委員，IPCCリードオーサ。吸収源活動の監視と予測，炭素クレジットとの認証と取引のモデル研究に従事。