



Title	航空機および地上リモートセンシングを用いた北方林広域森林バイオマス計測に関する研究
Author(s)	米, 康充
Citation	北海道大学演習林研究報告, 65(1), 61-131
Issue Date	2008-03
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/33061
Type	bulletin (article)
File Information	rbhuf-65-1-61.PDF



[Instructions for use](#)

航空機および地上リモートセンシングを用いた 北方林広域森林バイオマス計測に関する研究

米 康充

Study on methods of measuring boreal forest biomass using airborne
and ground-based remote sensing

by

Yasumichi YONE

要 旨

本論は、航空機および地上リモートセンシング計測を導入して、北方森林のバイオマスを広域に精度よく計測する手法および森林の過去のバイオマスとバイオマス変化の過程を把握するための手法について研究を行ったものである。本研究では設定した3つの課題に基づき、以下の手法が検討された。1) 針葉樹人工林においては航空機LiDARデータからWatershed法を用いて上層木を抽出し、MNY法を用いて下層木構造を推定することでバイオマスを算出する。2) 天然林および過去の時系列解析においては航空機LiDARデータと航空写真から樹冠面と地表面に挟まれた空間である「森林体積」を計測し、地上調査で計測したバイオマスとの相関式を作成することでバイオマスを算出する。3) 前記2)の地上調査を行う場合、地上レーザスキャナやデジタルカメラを用いて計測を行い、計測データにビッターリッヒ法の拡張である箕輪法の適用を行うことでバイオマスを計測し、森林体積-バイオマス相関式を作成する。結論として、これら3つの手法が広域森林バイオマス計測に有効な手法であることが示された。

キーワード：リモートセンシング、空中写真測量、ビッターリッヒ、森林バイオマス、航空レーザ計測

2007年8月31日受付, Received August 31, 2007

2008年1月31日受理, Accepted January 31, 2008

島根大学生物資源科学部生態環境学科森林環境学講座, 島根県松江市西川津町1060, 690-8504

Division of Forestry and Environment, Department of Ecology and Environmental Science, Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu-cho, Matsue, 690-8504 Japan

目 次

第1章 序論

- 1.1 背景と目的
- 1.2 論文の構成と用語の定義

第2章 研究課題と方法

- 2.1 従来の研究
- 2.2 研究課題と方法
- 2.3 研究対象地と計測単位

第3章 「単木法」を用いた航空機 Lidar による計測

- 3.1 はじめに
- 3.2 航空機 Lidar を用いた人工林のバイオマス計測
- 3.3 航空機 Lidar を用いた林分構造解析による人工林のバイオマス計測
- 3.4 航空機 Lidar を用いた天然林のバイオマス計測
- 3.5 まとめ

第4章 「森林体積法」を用いた航空機 Lidar による計測と航空写真による時系列解析

- 4.1 はじめに
- 4.2 航空機 Lidar を用いた天然林バイオマス計測

4.3 航空写真を用いた時系列解析とバイオマス計測

4.3 まとめ

第5章 地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測

- 5.1 はじめに
- 5.2 地上レーザスキャナを用いた単木解析
- 5.3 地上レーザスキャナを用いた林分材積の計測
- 5.4 魚眼写真を用いた単木解析
- 5.5 写真測量を用いた林分解析
- 5.6 まとめ

第6章 結言

- 6.1 本研究の成果
- 6.2 森林動態調査への活用例
- 6.3 広域森林バイオマス計測計画と高精度化へのアプローチ
- 6.4 おわりに

謝辞

引用文献

Summary

第1章 序 論

1.1 背景と目的

1997年に開催された気候変動枠組み条約第3回締約国会議（地球温暖化防止京都会議、COP3）で採択された京都議定書では、温室効果ガスを2008年から2012年の間（第一約束期間）に1990年比で先進国全体では5%を削減することとし、各国のエネルギー需給の状況などに応じて削減目標が設定された。例えば、EU：8%、アメリカ：7%、日本：6%、カナダ：6%、ロシア：0%、オーストラリア：8%、ニュージーランド：0%となっている。また議定書では目標を達成するための取組として、国際排出量取引（IET: International Emissions Trading）や共同実施（JI: Joint Implementation）、クリーン開発メカニズム（CDM: Clean Development Mechanism）といった「京都メカニズム」の導入、森林等の吸収源による吸収量を目標達成に当たって算入することとされた（山形・石井 2001）。ここで言う国際排出量取引とは、国や企業が温室効果ガスの削減目標を達成するための補完的手段として先進締約国の温室効果ガス排出削減量

が京都議定書の定める所の削減目標値を達成し、目標値以上に削減できた場合にその余剰分を他国へ売却できる仕組みや逆の場合には購入することである。共同実施とは、先進国間が共同で温室効果ガス削減プロジェクトを実施し、排出削減単位を投資国が獲得できる仕組みである。また、クリーン開発メカニズムとは、先進国と途上国が途上国において共同で温室効果ガス削減プロジェクトを実施し、そこで生じた削減分の一部を先進国がクレジットとして得て自国の削減に充当できる仕組みである。京都会議の後はCOP4（1998年11月2日ブエノスアイレス）、COP5（1999年10月25日ボン）において京都議定書の運用について話し合われてきた。COP6（2000年11月13日ハーグ）では、京都議定書が定めた二酸化炭素などの温室効果ガス6種類の排出量を削減する国際ルール作りを目指したが、合意には至らなかった。議定書の具体的内容が遅々として定まらない中で2001年3月にはアメリカが京都議定書の不支持を表明し、京都議定書の発効が危ぶまれた。しかしながら2001年7月にドイツのボンで開催されたCOP6 再開会合では、運用ルールの中核的要素

についての基本的合意が得られた。この中で特に大きな課題として継続的に議論されたのが、森林・農業の吸収源活動（3条4項活動）の取り扱いである。日本政府は1990年比3.7%の吸収量（3条4項の森林管理活動）を目指していたが、アメリカが離脱した後に行われたCOP7において最終的には90年以降に実施された森林管理活動にともなう吸収量の上限值として約3.9%（13Mt）が認められた。さらに同年10月末からモロッコのマラケシュで開催されたCOP7にて、京都議定書の発効に向けた運用ルールの細則を定める文書（マラケシュ合意）が決定された。そしてCOP9（2003年12月ミラノ）において吸収源のクリーン開発メカニズム（CDM）の実施などの細則が確定し、京都議定書実施のための準備がほぼ整った。

また、京都議定書を発効するためには、1）気候変動枠組条約の締結国55か国以上の締結及び、2）先進国の内1990年における二酸化炭素排出量の55%を占める国の締結という条件を満たす必要があった。2004年9月迄に125か国と欧州共同体が締結しており、既に1）の条件は完全に満たしていたものの2）の条件が揃っていなかった（約10%不足）。すなわちアメリカの不支持のため2）の条件を揃えるためにはロシア（先進国の内、二酸化炭素排出量に占める割合が約17.4%）の批准が不可欠であった。2004年10月22日、発効の鍵を握っていたロシアがついに批准を表明し、2005年2月16日に京都議定書が発効されることになった。これにより現実的に第一（2008-2012）、第二約束期間（2013-2018）での二酸化炭素排出量の削減を行っていくことになったが、気候変動枠組条約事務局によれば2003年での日本のCO₂換算温室効果ガス量は90年比で8.3%増にもなっている。したがって、第一約束期間に向けて2002年の時点から90年比で13.6%もの排出量削減を図らなければならない。このような状況の中、少なくとも国内森林吸収量の3.9%は必ず達成する必要がある、また京都メカニズムを利用した海外での森林吸収源増加活動の実施が不可欠である。

ところで、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。その主な内容は、排出・吸収量の推計を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ならないこと、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である。ま

た、第2約束期間以降にも対応できるようなシステムの構築が必要となる。このように、日本の管理された森林の大部分の炭素吸収量が京都クレジットとして認められたことや、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・評価していくシステムを構築し、推定制度を継続的に向上させてゆく必要がある。ここで炭素吸排出量の計上手法には、検証可能な方法で行うことが求められている。山形ら（2001）は炭素吸排出量計上の効果的な手法の一つ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が、リモートセンシングによるデータは広範囲・低コスト・均質・定期的なデータの取得が可能であり、再検証が可能な方法である。日本国内において、第1約束期間には森林簿に基づいた炭素吸収量評価手法が利用されることとなったが、森林簿から算出したバイオマスを再検証可能な方法で検証する必要があり、その方法としてリモートセンシングを用いたバイオマス推定手法が利用できると考えられる。また第2約束期間以降では、評価手法としてモデルとリモートセンシングを統合した方法が新たに検討されており、リモートセンシングを用いたバイオマスの推定手法は益々重要になると考えられる。リモートセンシング手法では、目的の空間スケールに応じて衛星によるデータや航空機によるデータが利用できるが、その中でも航空機Lidar計測は高精度で樹高が計測できることが期待される（洲浜 2001）ため、バイオマス推定に適していると考えられる。そこで本研究ではまず、航空機LiDARの導入による森林バイオマス計測方法の開発を行い、その計測精度や特性について明らかにすることを目的とする。次に、航空写真のデジタル写真測量の導入による現在・過去の森林のバイオマス計測手法の開発を行い、その計測精度や特性について明らかにする。森林の吸収量を算定する上で重要な要素として齢構造があげられる。国内の場合、人工林については森林簿や森林沿革簿といった森林のインベントリーデータが存在するが、天然林については精度良く整備されたものは少ない。そもそも天然林は人工林とは異なり「更新時期」が明確でなく、また不均一性を持つため、その林分構造データを「広域」に得ることは困難である。この点、空中写真は過去約50年のデータを広域に入手することが可能な唯一のデータであり、先の課題を充分補えるものと考えられる。また、地上調査のデータはこれらリモ

トセンシングによるデータ解析のために必要な裏付けであり、リモートセンシング計測の精度を上げるためにはグラウンドトゥルースとしての地上調査データができるだけ多く整備することが重要と考えられる。しかし、地上調査を従来の手法で行うには時間と労力がかかり多くの計測を行うのは困難であるため、地上調査を容易に行う方法を検討する必要がある。そこで、現地調査を簡便に行うための手法として、地上設置型レーザ計測器ならびにカメラを用いた手法を提案し、その計測精度や特性について明らかにすることを目的とする。

以上から、本研究は精度の良い森林インベントリーシステムを構築するために、航空機および地上リモートセンシング手法の導入による北方森林のバイオマスを広域に精度よく計測する手法、および森林の過去のバイオマスとバイオマス変化の過程を把握するための手法についての研究を行ったものである。

1.2 本論文の構成と用語の定義

1.2.1 本論文の構成

本論文は、全6章により構成されている。以下、2章からの内容を記述する。第2章では、従来の森林リモートセンシングについて概観し、本研究の課題と方法を具体化させる。第3章では、航空機LiDAR計測データを用いた森林バイオマス・材積の計測手法として「単木法」（第2章参照）を開発し検証を行う。第4章では、航空機LiDAR計測と航空写真のデジタル写真測量を用いて「森林体積法」（第2章参照）を用いた現在・過去の森林のバイオマス・材積計測手法

を検討すると共に、森林動態の把握手法について検討を行う。第5章では、現地調査のための地上リモートセンシング手法として、地上設置型レーザ計測器ならびにカメラを用いた手法を提案し検証を行う。第6章では、各章の要旨および結論を述べると共に今後の活用例についての提案を行い、論文を締めくくる。バイオマス計測手法全体の中での上記第3章～第5章の位置づけをFig. 1.2.1に示す。

1.2.2 用語の定義

（標高モデルの定義について）

本研究では、リモートセンシング計測時の中間成果として標高モデル（DEM, Digital Elevation Model）を取り扱う。これは、ある地表平面をメッシュ状に区切り、それぞれのメッシュでの標高値をデータ化したものである。ここで地表面上に立木や建物の様な地物が存在する場合、地物表面の標高と地面の標高が存在するが、これらは時と場合によってDEMあるいはDSM（Digital Surface Model）やDTM（Digital Terrain Model）と呼ばれ、用語の使用に混乱が生じている。そこで、本研究では地物表面標高をDSM（Digital Surface Model）、地面標高をDTM（Digital Terrain Model）と定義する。森林の場合、DSMは樹冠表面の標高を、DTMは地面の標高を表す（Fig. 1.3.1）。また、樹冠の高さを表現するため、次の式（1.3.1）を用いてDCHM（Digital Canopy Height Model）を定義する。

$$DCHM = DSM - DTM \quad (1.3.1)$$

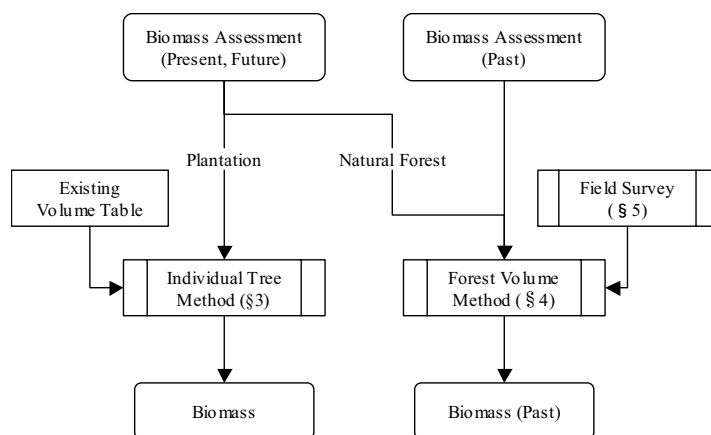


Fig. 1.2.1. Flow chart of this study.

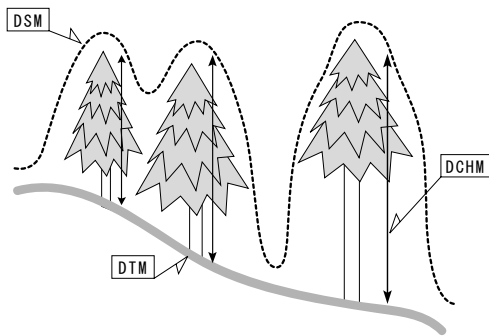


Fig.1.3.1. Diagram of digital models.

DSM (Digital Surface Model) shows the altitude of the tree crown surface. DTM (Digital Terrein Model) shows the altitude of ground. DCHM (Digital Crown Height Model) shows the height of tree crown surface above the ground level.

（Lidar 装置の呼称について）

Lidar (LIght Detection and Ranging)は、測定対象物に発射したレーザが反射して戻ってくる時間を元に対象までの距離を測定する装置である。近年商業化された航空機搭載型のLidar装置は、海外誌ではAirborne Lidar、国内誌ではレーザスキャナ、レーザプロファイラ、航空機ライダー、航空機レーザ計測等と呼ばれており呼称がさまざまである。本研究では「航空機Lidar」を用いる。また、地上設置型のレーザスキャナも、地上設置型ライダーや地上レンジングスキャナ、レーザ距離計等呼称がさまざまである。本研究では「地上レーザスキャナ」を用いる。

第2章 研究課題と方法

本章では、森林のリモートセンシング手法について「航空・衛星リモートセンシングの手法」、「リモートセンシングを用いたバイオマスの算出手法」、リモートセンシングのツールズとして必要な地上調査の手法について、特に「地上リモートセンシングの手法」を概観することで、今後のリモートセンシング計測について克服すべき課題を明らかにするとともに、本研究での課題克服のための方法について述べる。

2.1 従来の研究

2.1.1 リモートセンシングを用いたバイオマスの算出手法

リモートセンシング、特に航空写真を用いた計画区等広域の材積推定の方法として渡辺（1993）は、ま

ず対象地域を林相に分け林型（樹種・平均樹高・樹冠被覆度・立木本数など）で層別し材積を判読、現地のサンプリング調査により材積補正を行い、全域の蓄積量を集計するとしている。この中の材積判読・蓄積計算の方法について、中島（1961）は(1)判別写真による比較測定、(2)写真林分による推定、(3)単木材積表による推定、(4)林分縦断面による材積推定の方法をあげている。

(1) 判別写真による比較測定は、層別にサンプリング・現地調査・材積調査を行い、判例カードとして整理を行う。そして、材積査定の際には写真判読結果と判例カードを照らし合わせながら、判読者の経験により対象林分の材積量を推定する方法である。この方法は精度評価ができないという問題点があり、また判読の経験という数値化の困難な要素があるため、リモートセンシングデータの大量自動処理には不向きと考えられる。

(2) 写真林分による推定は、予め空中写真材積式を調製しておき、写真の判読要素（樹高・樹冠幅・樹冠被覆度等）と材積式を用いることで林分材積を求める方法である。大量自動処理のためには、判読要素の抽出が重要になると考えられる。

(3) 単木材積表による推定は、地上材積表と同じ考え方で樹高や樹冠直径から単木の材積を求め、これを積算することで林分材積を求める方法である。大量自動処理のためには(2)と同様に判読要素の抽出が重要になると考えられる。

(4) 林分縦断面による推定は、林分縦断面が材積と相関の高い要素である樹高・樹冠面積と相関が高いため、これを用いた材積推定方法のアイディアは古くから存在していた（帝国森林会 1936）。そこでは長さ l の林分縦断面積を計測し a で乗じることで面積 $l \times a$ の森林体積を推定し、林分材積との相関式を作成している。しかし、その計測の困難さからか、その後の研究事例は多くない。近年、この林分縦断面が航空機Lidarにより簡単に計測できるようになったことから、森林の広域計測に用いられるようになった。末田ら（2002）は、縦断面積の1.5乗とバイオマスとの相関を求めることで、広域の森林バイオマスの推定を行っている。航空機Lidar計測では直接森林体積が計測できることから、林分縦断面の方法は有望な方法であると考えられる。

以上、4つの方法からリモートセンシングデータの自動計測に有用な方法は、(2)～(4)と考えられる。本

研究では、判読要素の抽出という観点から(2)(3)の方法を「単木法」、(4)を「森林体積法」と定義する。単木法では既存の材積表や空中写真林分材積表を使用することができるため、必ずしも地上調査は必要ないという特長がある。一方、森林体積法は既存データもほとんど無いため地上調査は欠かせないが、処理が単純であるという特長がある。そこで本研究では、バイオマス計測方法として単木法と森林体積法の双方を試みる。また、あわせて森林体積法に必須の地上調査の効率化の手法についても試みる。

2.1.2 航空・衛星リモートセンシングの手法

森林をリモートセンシングで計測する手法として、日本においては1930年頃から南樺太(現サハリン)での調査に航空写真の利用が開始された(中島 1961)のが最初とされている。その後1940年ころから関東地方において航空写真撮影が行われたが、第二次世界大戦の開始により中断された。戦後は、1947年にアメリカ軍によって撮影された1/40,000写真による森林層化や判読の研究が行われた。また同時期には、森林標本調査の理論研究(西沢 1959)も行われ、この理論も取り込みながら、航空写真を用いた森林調査の理論と方法は、中島(1961)やTaniguchi(1961)によってほぼ確立したと考えられる。航空写真の判読値から材積を求める航空写真林分材積表は、渡辺・遠矢(1960)、谷口(1962)、大島ら(1962)、合沢ら(1969)や中島ら(1969)により事例の積み重ねと調製が行われ、また同時に精度向上のための手法開発が行われ発展した。さらに1970年には中島ら(1969)の成果を受け、全国国有林で空中写真材積表Ⅱ型(渡辺 1993)の調製が事業化された(林野庁計画課 1970a)。その後は事例研究・応用研究が積み重ねられるものの、1980年代以降次第に研究のアクティビティは衰退していった。また現場においては、林分状況の把握や定性的な判断には用いられているが、定量的な把握には用いられることが少なくなっている。これは定量的な判読には熟練が必要であるが、その技術継承がされてこなかったためと考えられる。先の空中写真材積表Ⅱ型の材積表も利用されず、倉庫の片隅で一時期滅失の危機にあったとされている。

代わって1980年代頃からは、人工衛星データ(Landsat TM)を用いた森林資源調査の研究が活発化する。1981年からは北海道にて伐採照査業務への利用がなされた(栗屋 1988)。1990年代に入ると GIS

と併用して林分の状況チェックに利用(加藤 1990)された。また、松くい虫の被害調査や植生指標を用いた緑資源量の把握(東 1994)、地滑り危険地調査への活用(小林 1995)、針葉樹樹冠疎密度の推定(加藤 1997)などが行われている。Landsat TM データはそのデータ処理の自動化も可能なため、今後広く使われる可能性があると考えられる。しかしデータの解像度が30 mのため広域の林分を把握するには適しているが、林分内部の詳細な調査を行うには情報が不足しているという課題がある。

これに対し、近年商業化された航空機 Lidar を用いた森林計測手法が検討されている(洲浜 2001)。これは、航空機に搭載した Lidar を用いて地面標高(DTM)と樹冠上面標高(DSM)の測定が可能となるもので、高精度で樹高が面的に計測できることが期待されている。Lidar 計測の重要なファクターとしては、使用するレーザのフットプリントサイズと照射するパルス密度が挙げられる。レーザは元々ビームの広がり角の小さな光線であるが、それでもある程度の広がり角があるため計測対象物に照射される範囲には広がりを持っている。フットプリントとはレーザが計測対象物に照射される範囲のことであり、そのサイズは直径で表す。また、レーザを用いて地上を面的に計測するためには、レーザを高密度で照射する必要がある。パルス密度とはこのレーザを照射する密度のことで、レーザ点の間隔あるは単位面積あたりの照射点数で表す。Lidar 計測の森林域への応用は、フットプリントサイズが10m 程度の大きな直径のレーザでプロファイルを用いた樹高や林分材積の計測の研究が1980年代中頃から行われてきた(Maclean and Krabil 1986, Nelson *et al.* 1988, Nilsson 1996, Næsset 1997, Lefsky and Acker 1999, 末田ら 2002)。1990年後半以降になるとフットプリントサイズが30cm 以下のレーザを高密度で照射し、面的に地上をスキャンする Lidar システムが商業ベース化され、このシステムを用いた森林での研究が活発化している(Magnussen *et al.* 1999, 田村・高槻 2000, 林ら 2001, 鷹尾・高橋 2002)。これらの研究では樹冠率や樹冠面高分布の計測・評価は行われているが、森林の蓄積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 を用いて樹高・材積について評価した事例(Hyyppä *et al.* 2001)もあるが、パルス密度が約10m⁻² 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。森林の広域計測に利用するためには、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、本研究では航空機 Lidar データを用いて樹高・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にした。また、これまで航空機 Lidar を用いて森林の成長解析を行った研究はほとんど存在しない。そこで本研究では、同一林分で1999年、2001年、2003年に行った航空機 Lidar データを行い、その間の林分成長について解析を行い精度の検証も行うことにした。

一方、航空機 Lidar は現在・将来にわたって利用可能なデータであるが、過去の高解像度時系列リモートセンシングデータとしては航空写真しかなく、判読によらない航空写真の解析の方法が必要である。このような判読によらない方法として、ステレオペアの航空写真画像から自動的にマッチングポイントを探索して地物の表面標高 (DSM) を連続的に計測する方法がコンピュータの発達と共に普及してきており、近年森林域における研究もおこなわれている (松本 2000, 佐野 2000)。この解析では森林の樹冠面標高 (DSM) を詳細に計測することが可能ではあるが地面標高 (DTM) を得ることができないため、森林バイオマスの算出が困難であると考えられる。そこで本研究では、航空写真のステレオマッチングにより得られる DSM に上記の航空機 Lidar で得られる DTM を組み込んだ時系列解析手法について研究を行うことにした。

2.1.3 地上リモートセンシングの手法

地上での林分の調査方法としては古くからプロットを設定し、胸高直径・樹高・樹種の毎木調査を行い、材積表にて単木材積およびその積算としての林分材積を求める方法が行われてきた。近年、電子野帳や GPS、トータルステーション等の新しい測器が導入されているが基本的な計測方法はかわらないため、調査に人工がかかりすぎるという課題が常に残っている。このように人工のかかる毎木調査を地上リモートセンシングの手法で行おうとする試みは、これまでにいくつか行われてきた。たとえば、回転カメラによる方法 (鷹尾 1991) やレーザープロジェクター (Tanaka *et al.* 1998)、レーザーポインター (菅藤 1999)、地上レーザスキャナ (大政ら 2001, 吉村 2001, 林ら 2001)

など、レーザを用いた方法が試みられている。近年、開発が進んで性能が向上している地上レーザスキャナによる方法は、データ取得の容易さから林分の近接リモートセンシング装置としては最も有望な方法の一つであると考えられる。地上レーザスキャナによる森林計測の方法では、林ら (2001) が立木断面のエッジを抽出する方法でスキャナ本体の設置高と同じ高さの立木直径の計測に成功しているものの、スキャナの設置高以外は計測できないため、傾斜地での胸高直径の計測や上部直径などの計測には利用できないなど、実用性の点で課題があった。そこで本研究では、まずスキャナにより計測された点群を円柱でモデル化する手法の研究を行い、胸高直径および立木位置の計測精度の検証を行う。

また、これまでの地上レーザスキャナによる研究は、主に DBH の測定精度や DBH から推定したバイオマス推定について議論されている (大政ら 2002) が、この方法を用いてさまざまな林分に利用しようとした場合、樹高曲線や完満度を表す胸高形数をあらかじめ林分毎に作成する必要がある実用性に課題があった。また、広範囲を計測しようとした場合、複数点からの計測データを接合する必要がある。しかし、森林の様な不定形の物体を接合点として利用すると正確に接合できないという課題があった。接合の課題を解決する方法として、それぞれの計測点での材積値を確率論的に算出して、複数の計測点での結果の平均を用いる方法が考えられる。そのような林分調査の方法として、毎木調査の手法によらず測定を行おうとする試みはこれまでも行われており、その代表的な方法がビッターリッヒ法 (Bitterlich 1947) である。ビッターリッヒ法は、ある十分に広い林地において無作為に点を落とし、その点に立って周囲の立木の胸高を視角 α のスリットで観測し、その数を数えることで胸高断面積合計を計測する手法である。その後、この方法を元に平田 (1955)、Essed (1955) によって林分平均樹高を測定する方法が発表された。さらに林分材積の計測方法については、林分区分求積法 (Bitterlich 1955)、一致高和による林分材積査定法 (北村 1964)、上部直径測定による林分材積測定法 (箕輪 1976)、三次元標本空間への適用 (上野 1979) をへて、理論的に確立した (南雲・箕輪 1990)。本研究では計測点データ間接合の必要性がない確率論的な手法であることや、樹高曲線や胸高形数の様なあらかじめ調製しておくパラメータの必要性がない点を考慮し、箕輪 (1976) の上

部直径による林分材積推定法（以下箕輪法）の理論を用いて地上レーザスキャナデータを処理する手法の研究を行い、先の課題を解決するとともにその計測値の精度検証を行う。

次に、なるべく安価に計測できることを目標に、写真画像と実体との関係付けが容易な魚眼レンズを用いた手法の研究を行い、立木位置・胸高直径等の計測精度検証を行う。

さらには人的な解析作業の負担をかるくするため、写真測量による自動マッチング手法と箕輪法を組み合わせた方法の研究を行い、材積の計測精度検証を行う。

2.2 研究課題と方法

上述した従来の研究を概観することで、これまでのリモートセンシング手法では以下のような課題があることが明かになった。

- 1) 林分の材積査定方法としては航空写真判読手法が確立しているが、判読に熟練を要するため広く用いられるにはいたっていない。また、Landsat TM を用いた手法では広域の解析を行うには適しているが、林分の詳細な情報を得るまでにはいたっていないという課題がある。
- 2) 近年商業化された航空機 Lidar を用いた計測方法には、機械的に（熟練を必要とせずに）・自動的に森林材積の把握が可能となるといったメリットがある。ただし、レーザスキャナを用いた計測方法にもパルス密度の精粗や下層木がキャッチされないことによる精度の低下といった問題が存在する。
- 3) 航空機 Lidar を用いた計測方法は、実用化が最近であることから過去の情報が存在せず、過去にさかのぼった把握や時系列的な解析が不可能といった問題もある。
- 4) 航空機 Lidar データから林分材積を求める場合、空中写真林分材積表や森林体積と林分材積の相関式を作成する必要がある。その際に多くの地上調査を行う必要があるが、調査に手間がかかるという問題がある。

本研究ではこれらに対し、以下の方法で解決を試みることにした。

- 1) 航空機 Lidar を用いた森林バイオマス計測手法の検討（3章・4章）
- 2) 航空写真の林分材積表求積の考え方を航空機

Lidar 計測に導入することで解決を図る。さらに、密度補正式の考案と下層木材積の推定方法を考案する（3章）

- 3) 空中写真のデジタル情報に航空機 Lidar から作成した DTM を組み込むことによる時系列解析方法を検討する（4章）
- 4) 簡便に地上バイオマス計測を行うため、地上レーザスキャナ・写真測量に計測手法の検討を行う。（5章）

以上の内容を広域バイオマス計測手順としてまとめたのが Fig. 2.2.1 である。現在・将来にわたっての広域バイオマス計測には、航空機 Lidar を用いることができる。データ処理は人工林の場合、単木法を用いる。単木法では既存の材積式や空中写真林分材積表を用いることができるため、必ずしも新たに材積式を調整する必要はなく、航空機 Lidar 計測だけでバイオマス推定を行うことができる。一方、樹冠が不定形であるため単木法の適用が困難な天然林の場合は、森林体積からバイオマス推定を行う。また、単木法の適用可能性がある針葉樹一斉林においても、小規模である等の理由により他の林相との区分が困難な場合には同様に森林体積からのバイオマス推定も可能である。この方法では、単木法の様に既存の材積式は存在しないため、地上でのサンプリング調査が必須となる。地上では多くのサンプリング調査が必要なことから、地上レーザスキャナ・写真を用いた調査手法を用いる。このサンプリング調査で、森林体積－材積式を作成することで全体のバイオマスを計測することが可能となる。また、過去の森林についても航空写真から DSM を作成することで、航空機 Lidar 計測と同様な処理でバイオマス計測を行うことができる。

2.3 研究対象地と計測単位

2.3.1 研究対象地

本研究は、北海道黒松内低地帯以北の森林を主な対象とした。北海道黒松内低地帯以北の地域は汎針広混交林（Tatewaki 1958）を形成しており、温帯林から北方林への移行帯に属している。FAO（2001）によると北方林は世界の森林面積の33%を占め熱帯林の47%に次いで大きな面積であり、世界の中で重要な地位を占めている。近年この北方林の中でもロシア極東地域では、大規模開発、伐採、森林火災等により森林蓄積の減少が進んでおり（環境庁 1998）、森林保全や温暖化防止の点からその進捗が危惧されている。した

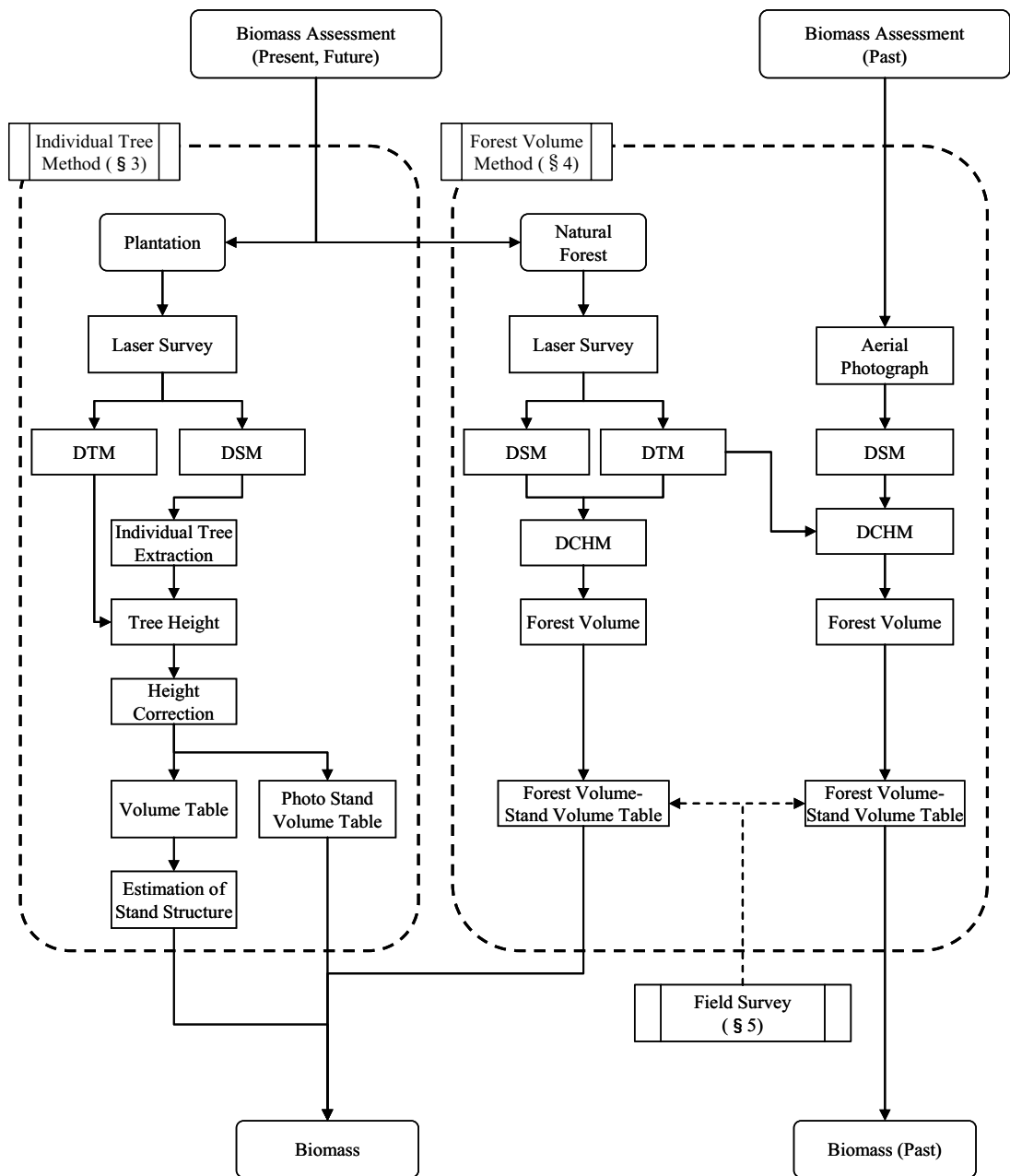


Fig. 2.2.1. Flow chart of forest biomass survey process.

がって地球温暖化の防止の観点から、この地域の森林を効率よくモニタリングする手法の研究が必要とされている。ロシア極東地域は植物地理学的に見ると「亜寒帯」および「温帯から亜寒帯への移行帯」に位置し

ており、樹種はカラマツを中心にエゾマツ・トドマツ・カンバ・その他広葉樹等が生育しており、我が国の北海道の森林と類似した構成となっている。このため、北海道黒松内低地帯以北の森林を研究対象とする

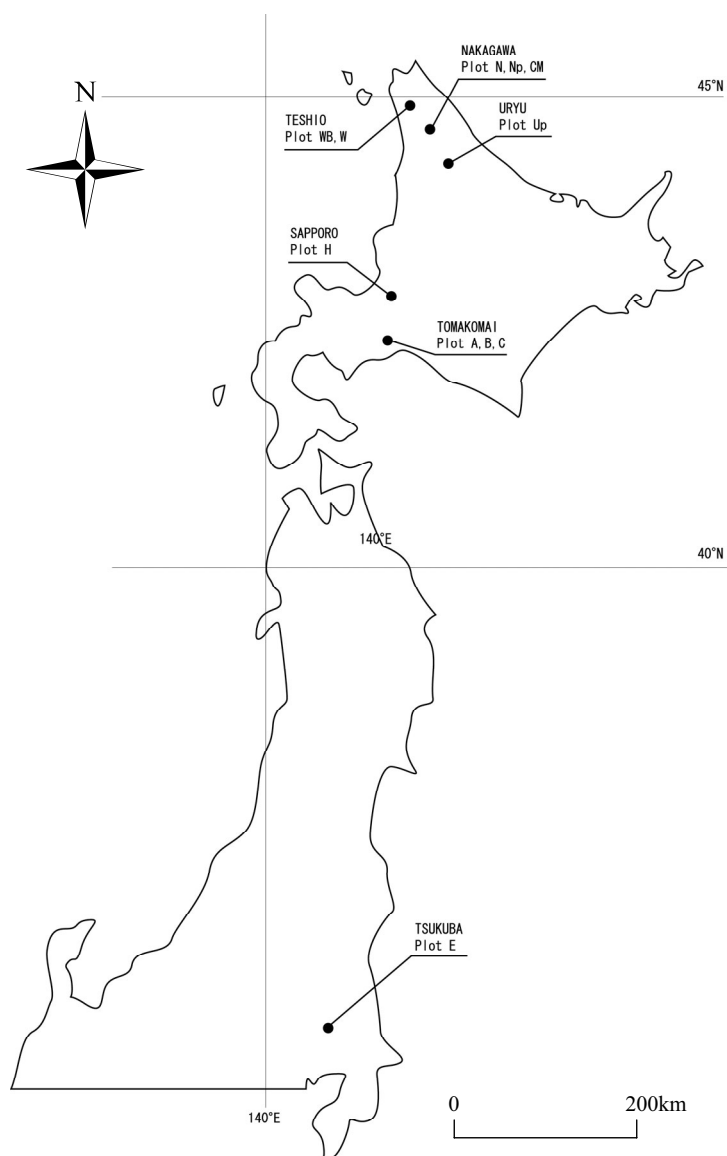


Fig 2.3.1. Study sites.

ことで、北海道を含めた北方林のモニタリングに広く貢献できる可能性がある。なお、一部計測手法の研究については北海道の他、本州にて補足的に行った (Fig. 2.3.1)。

2.3.2 バイオマス計測単位

本研究ではバイオマス計測を取り扱うが、一般にバイオマスの単位としては炭素循環・物質生産・木材

生産の観点から、それぞれ炭素重量 (tC)・バイオマス (乾重量: t)・立木幹材積 (m³) が用いられる。森林の炭素吸排出量の議論においては炭素重量が用いられている。

炭素重量・バイオマス・立木幹材積の間の変換は、基本的には次の式によって可能である (松本 2001)。

$$W = \rho_0 \times V \times E \quad (2.3.1)$$

$$Wc = W \times C \quad (2.3.2)$$

ここで、 Wc ：炭素重量 (tC)、 W ：乾重量 (t)、 ρ_o ：容積密度 (t/m³)、 V ：幹材積 (m³)、 E ：拡大係数、 C ：炭素含有係数である。容積密度は樹種によって異なり、針葉樹・落葉広葉樹・常緑広葉樹の平均値は「木材工業ハンドブック (林業試験場 1982)」によると、それぞれ0.37t/m³・0.47t/m³・0.61t/m³であり全樹種の平均値は0.45t/m³である。また、IPCC ガイドライン (IPCC 1996) でもデフォルト値として0.45t/m³が設定されている。拡大係数は樹種・林齢によっても異なるが、針葉樹・広葉樹の平均値としてそれぞれ1.7・1.8が使用される (松本 2001)。炭素含有量は、一般的に0.50が使われている (林業試験場 1982, IPCC 1996)。本研究において炭素重量を求めるにあたっては上記の方法・係数を基本とし、一部現地調査で得られた係数を使用している。

上記の様に、炭素重量・バイオマス・立木幹材積の間で比較的簡単に変換が可能ことから、本研究においてバイオマス計測の単位としては材積量 (m³) を使用し、必要に応じて炭素重量 (tC)・バイオマス (乾重量:t) へと変換を行う。これは、今日までの森林管理では木材生産に主眼をおいていたため、材積量を目的または要因とした各種資料 (材積表・密度管理図・航空写真林分材積表等) が広域・詳細に整備されており、材積を変数に加えることでこれらの知見を利用することができるためである。また材積を求めることで本研究が炭素吸収排出評価だけでなく林業的な意義も加えることができ、広く森林管理に利用すること

ができると考えたためである。

第3章 「単木法」を用いた航空機 Lidar による計測

3.1 はじめに

Lidar は、測定対象物に発射したレーザが反射して戻ってくる時間を元に対象までの距離を測定する装置である。航空機 Lidar ではレーザビームが樹冠に到達すると木漏れ日の光の様に樹冠中を通過するため、その過程の中で複数回の反射パルスを観測することが可能である。最初に反射した地点を林冠、最後に反射したものを地面と仮定することで林冠高の測定が可能となる (Fig. 3.1.1)。

航空機 Lidar による計測点データそのものの精度は水平±30 cm、垂直±15 cm であるが、森林の様な複雑な地物の場所では精度が低下することが予測される。そこで、本章では最初に航空機 Lidar の森林域における精度を検証する。森林構造の比較的単純なカラマツ人工林において単木抽出を行いその計測樹高や地面標高の精度検証を行うと共に、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。また、航空機 Lidar に適した材積・炭素重量算出方法を検討するため、材積表・密度管理図・航空写真林分材積表 (渡辺 1993) を用いて材積・炭素重量を算出し、その精度検証を行う (3.2)。次に、短期間 (数年程度) の森林の成長をモニタリングする場合を想定し、より高い精度での計測方法の検討を行う。精度低下の一つの原因としては、レーザが先端に当たらないことによって樹高が過小評価されることがあり、パルス密度が下がるほど当たる確率は下がると考えられる。現実のモニタリング事業を考えた場合、計測対象面積や予算によってパルス密度は変動すると考えられ、精度向上のためにはこの密度依存性を解消する必要がある。そこで、樹高計測値の密度依存性の解消を行うため、樹高補正方法を検討する。また、精度低下のもう一つの原因として上空からの計測では測定することができない下層木が存在することがある。本項では、林分構造を推定することにより下層木も含めた材積計測手法の検討を行う (3.3)。最後に、より複雑な森林構造を持つ森林において上述の単木抽出法の有効性を検証するために、針広混交天然林において抽出本数・計測材積の検証を行う (3.4)。

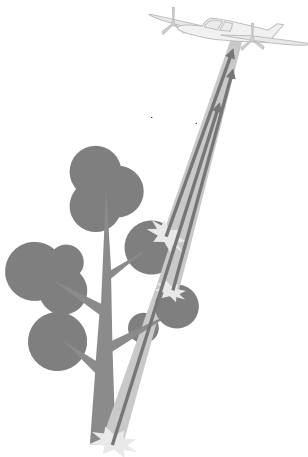


Fig.3.1.1. Diagram of airborne lidar.

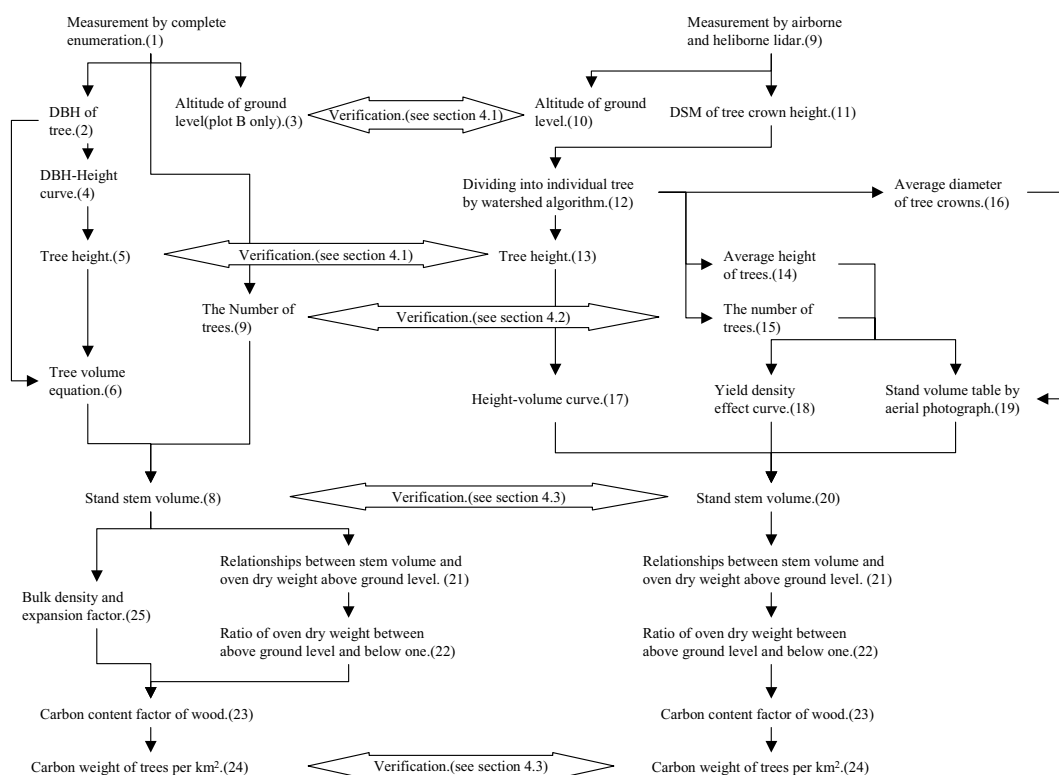


Fig.3.2.1. Flow chart of estimating carbon weight using DSM data measured by airborne and heliborne lidar.

3.2 航空機 Lidar を用いた人工林のバイオマス計測

3.2.1 調査地概要および計測条件

3.2.1.1 検証林分概要

調査地は苫小牧市内にある国有林苫小牧1197林班・1198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300m×100mのプロット（以降、Plot A）、198林班には100m×70mのプロット（以降、Plot B）を設定し毎木調査を行った（Fig.3.2.1(1)）。

調査区内の胸高直径（DBH；地上高1.3m位置での立木直径）5 cm以上の立木に対し、胸高直径（Fig. 3.2.1(2)）・立木位置の測定を行った。さらにPlot Bにおいては、各立木の根本標高を計測した（Fig. 3.2.1(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1.3m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（3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4）を作成して全木にあてはめることにより求めた（Fig. 3.2.1(5)）。また、立木幹材積（Fig. 3.2.1(8)）は胸高直径・樹高より幹材積表編成式（Fig. 3.2.1(6)）を用いて求めた。カラマツについては北海道立木幹材積表（中島 1948）編成式を用い、エゾマツ・広葉樹については立木幹材積表（林野庁計画課 1970b）編成式を用いた。

（カラマツ）

$$F1 = 0.435719 + 0.515867/H + 2.481278/H^2$$

$$F2 = 0.439004 + 0.916461/D - 0.073809/D^2$$

$$V = \pi (D/200)^2 \times H \times (F1 + F2) / 2 \quad (3.2.1)$$

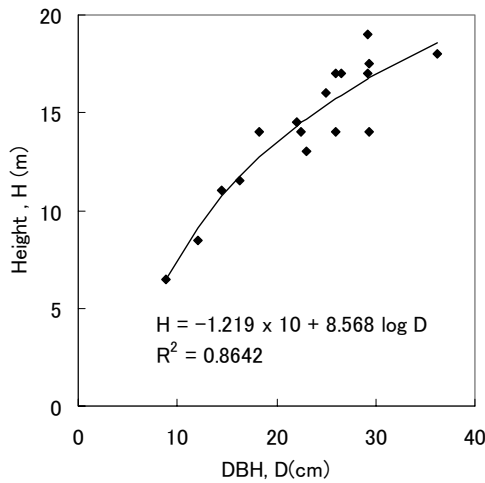


Fig. 3.2.2. Diameter-height curve for coniferous tree in Plot A.

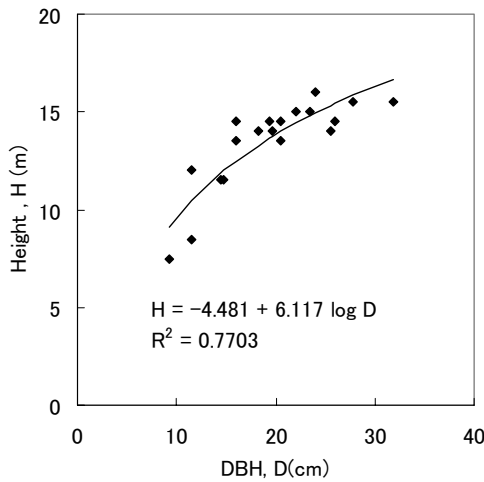


Fig. 3.2.3. Diameter-height curve for coniferous tree in Plot B.

(エゾマツ)

$$V = 10^{(-4.0744 + 1.824080 \log D + 0.934568 \log H)} \times 1.0048 \quad (3.2.2)$$

(広葉樹)

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

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

$$V = 10^{(-4.332596 + 1.853014 \log D + 1.166956 \log H)} \quad (22 \leq D < 30) \quad (3.2.3)$$

 V : 立木幹材積(m^3) 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*) 人工林で、ほか

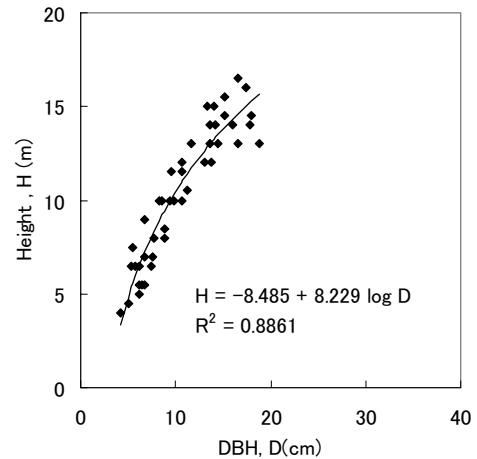


Fig. 3.2.4. Diameter-height curve for broad-leaved tree.

Table 3.2.1. Flight Data.

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
Altitude above 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 [First + Last Pulse] (m^{-2})	1.20	2.34	2.25	2.32	81.12
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

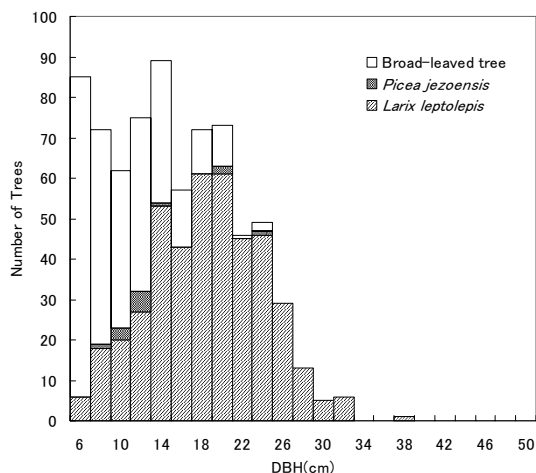


Fig. 3.2.5. Histogram of total number of trees in Plot A.

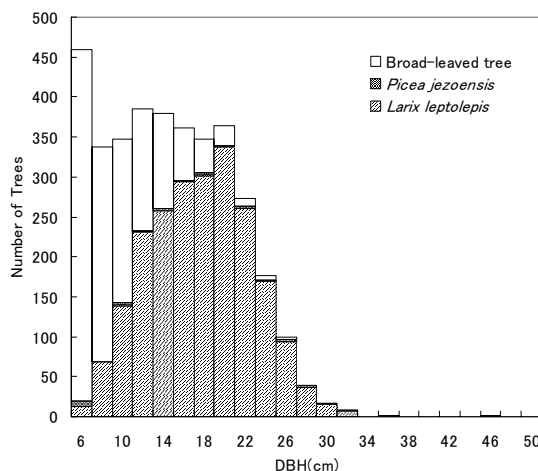


Fig. 3.2.6. Histogram of total number of trees in Plot B.

にエゾマツ (*Picea jezoensis*)、広葉樹が侵入している (Fig. 3.2.5, 3.2.6)。林床はオシダ (*Dryopteris crassirhizoma*)、シラネワラビ (*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、一部ミヤコザサ (*Sasa nipponica*)、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1200本/ha・148.92m³/ha、Plot B が1010本/ha・152.77m³/haであった。

3.2.1.2 航空機 Lidar 計測

航空機 Lidar 計測は、Table 3.2.1に示す5つの観測を行った (Fig. 3.2.1(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:1.20m⁻², Obs.A6:2.25m⁻²)、および飛行高度を変えた観測 (Obs.A4:400m, Obs.A6:600m, Obs.A8:800m) 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 と表現し、双方を区別する場合は航空機搭載型 Lidar・ヘリコプター搭載型 Lidar と記載することとする。

3.2.2 データ解析および精度検証方法

3.2.2.1 航空機 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、0.33mGrid のDTM データを作成した (Fig. 3.2.1(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、0.33mGrid 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(DCHM)を作成した (大政ら 2000) (Fig. 3.2.1(11))。

3.2.2.2 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て樹冠の抽出を行った (児島 2001) (Fig. 3.2.1(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クを設定する。
- 2) 樹高値勾配に沿ってマークを成長させる。
- 3) 隣接する樹冠のマーク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. 3.2.1(13))。また、推定樹冠高・抽出本数から各Plot毎の平均樹冠高 (Fig. 3.2.1(14)) と ha 当た

り本数（Fig. 3.2.1 (15)）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として算出し、さらにこの樹冠直径値を用いて各 Plot 毎の平均樹冠直径（Fig. 3.2.1 (16)）を算出した。

3.2.2.3 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・検証を行った。

3.2.2.4 材積および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、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、材積を用いる

ことでこれら既存の資料を利用することができるためである。

航空機 Lidar 計測値から材積を推定するにあたっては、樹高－材積の関係式を用いる方法（Fig. 3.2.1 (17)）、人工林密度管理図（林野庁 2000）を用いる方法（Fig. 3.2.1 (18)）、空中写真林分材積表を用いる方法（Fig. 3.2.1 (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、航空機 Lidar 計測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. 3.2.1 (17)）は、樹高曲線式（Fig. 3.2.2, Fig. 3.2.3）および、式（3.2.1）より作成し材積を求めた（Fig. 3.2.1 (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. 3.2.1 (18)）を用いて林分幹材積を求めた（Fig. 3.2.1 (20)）。

$$V = (0.0651368 H^{-1.230184} + 9492.9 H^{-2.948559}/N)^{-1} \quad (3.2.4)$$

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

Table 3.2.2. Volume Table for aerial-photographical 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

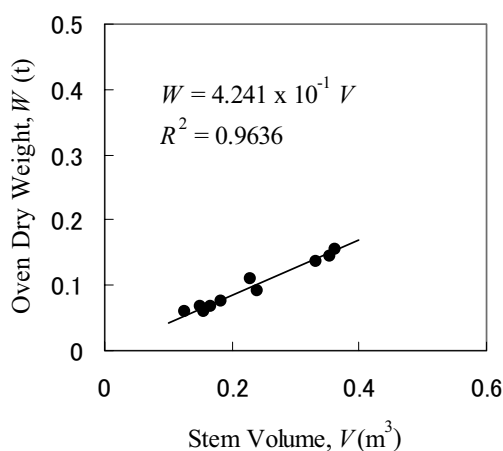


Fig. 3.2.7. Relationships between stem volume and oven dry weight.

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（札幌営林局計画課 1978）を使用（Fig. 3.2.1 (19)）し、林分幹材積を求めた（Fig. 3.2.1 (20)）。Table 3.2.2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. 3.2.7, Fig. 3.2.1 (21)）。また、根を含む全乾重量の推定には松本らの推定方法（松本・鹿又 2002）に従い、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. 3.2.1 (22)）。さらに、炭素含有係数0.50 (tC/t)（Fig. 3.2.1 (23)）を用いて炭素重量への変換を行った（Fig. 3.2.1 (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. 3.2.1 (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が少ないことから、容積密度の平均値・拡大係数（松本 2001）を用い次式で変換を行った（Fig. 3.2.1 (25)）。

$$Wc = \rho_o \times V \times E \times C \quad (3.2.5)$$

Wc ：炭素重量 (tC)

ρ_o ：容積密度 (t/m³, エゾマツ：0.314, 落葉広葉

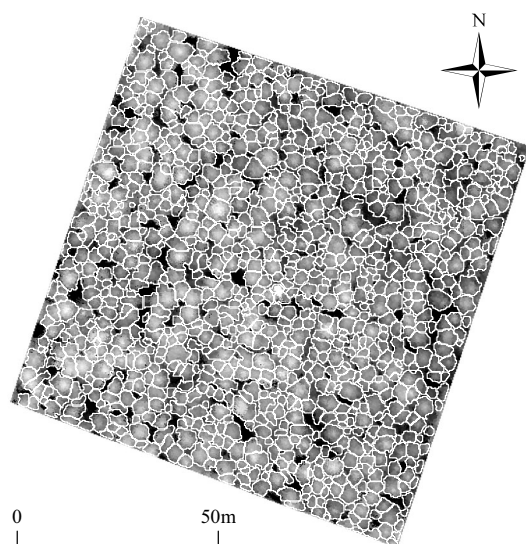


Fig. 3.2.8. Canopy DSM and crown polygons around Plot B. Shade image shows the altitude of DSM. White lines shows crown polygons derived from DSM.

樹：0.47)

V ：幹材積 (m³)

E ：拡大係数（針葉樹：1.7, 落葉広葉樹：1.8)

C ：炭素含有係数 (tC/t：0.5)

3.2.3 結果と考察

3.2.3.1 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、ヘリコプター搭載型 Lidar (Obs.H) 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 1中央部の突出部分はフラックス観測用25mのタワーである。Fig. 3.2.8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 3.2.3 に示す。これによると、地上標高計測の系統誤差（誤差平均）はおおよそ20cm～70 cm、偶然誤差（誤差平均の標準偏差）はおおよそ30cmであった。系統誤差と偶然誤差の双方を考慮した指標である RMSE

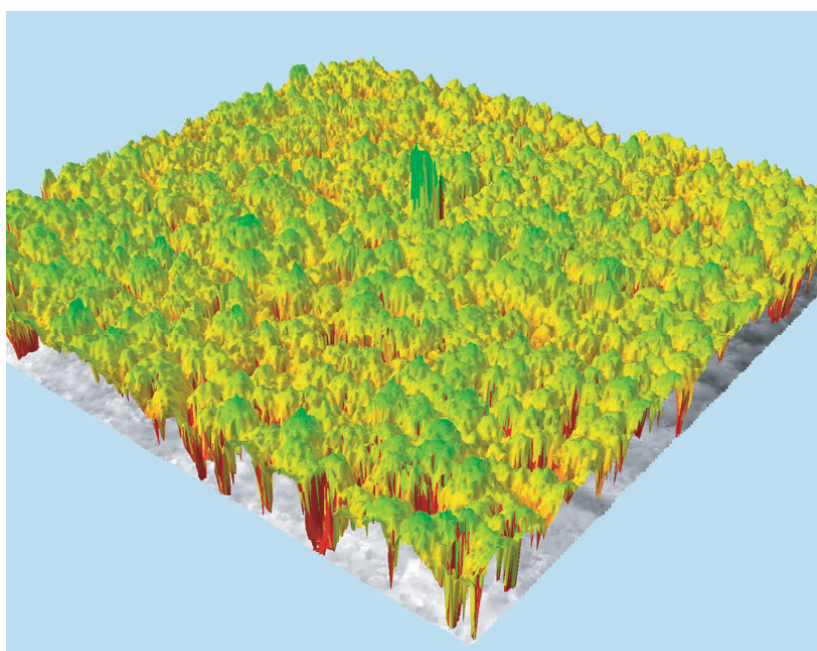


Plate1. Bird-view of canopy DSM and DTM around plot B.

Table 3.2.3. Difference error between measured ground altitude and lidar-derived ground altitude.

Plot Name	Observation Name	Obs.O	Obs.A4	Obs.A6	Obs.A8	Obs.H
Plot B	RMSE (m)	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 3.2.4. Difference error between measured tree height and lidar-derived tree height.

Plot Name	Observation Name	Obs.O	Obs.A4	Obs.A6	Obs.A8	Obs.H
Plot A	RMSE (m)	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	RMSE (m)	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

(Root Mean Square Error) はおよそ30cm～80cm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 3.2.4に示す。樹高計測のRMSEはおよそ90cm、系統誤差はおよそ10cmであるがPlot AのObs.Hのみ27cmであり、有意な差が見られた。Obs.HのLidar計測は現地調査から1年6ヶ月後に行われており、この間に樹高が成長しているため計測値に有意な差が見られたと考えられる。偶然誤差はおよそ90cm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が、樹高は比較的よい値を示している。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、航空機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、林冠梢端標高・地上標高を含めた全体の計測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30cm程度とされるが、本結果はこれよりも大きな値となった。航空機LiDARデータの位置情報は、GPSと慣性計測装置を組み合わせたGPS/IMU (Global Positioning System / Inertial Measurement Unit) を用いてリアルタイムに計測される。この計測結果にはGPS衛星の配置状況により一律に数十cm程度の誤差を生じる場合がある。本結果のObs.A6とObs.A8の誤差平均の差が50cmもあることから、航空機LiDARの計測誤差はGPS衛星の配置状況の違いによって発生した系統的な誤差である可能性が考えられる。また、GPS/IMU計測結果に生じる標高誤差は、短時間内であれば一律と見なすことができるため、計測範囲の中にGCP (Ground Control Point : 地上基準点) を設置して標高計測することで補正が可能である。しかし本計測では、この標高計測に誤差があった可能性も考えられる。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GCPの設定が必要と考えられる。

地上標高の偶然誤差は30cm前後であった。これは航空機Lidarそのものの計測精度が15cm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判断される。一方、樹高の偶然誤差は90cm前後と大きな値を示した。樹冠上面標高の航空機Lidar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(1966)によると、標本抽出にもとづく樹高曲線の誤差は最大±2m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。

本研究の結果より、航空機Lidar計測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、トゥルースの測定精度以内に納まっていると考えられた。これはパルス密度・撮影高度・航空機搭載型・ヘリコプター搭載型にかかわらず同様の傾向を示した。このことより本研究で用いたパルス密度 1.2m^{-2} 以上、フットプリントサイズ $0.05\sim0.24\text{m}$ のLidar計測を利用すれば、本手法はカラマツ人工林の林分樹高計測に有効な方法であると考えられた。

3.2.3.2 本数計測精度の検証

Fig. 3.2.9、3.2.10、Table 3.2.5にPlot AおよびPlot Bにおける樹高階別のトゥルースの本数および、航空機Lidar計測およびWatershed法による計測本数を示した。これらによるとトゥルースの樹高階別本数のグラフは、11～14mおよび7～8m付近にピークを持つ2つ山の形をしており、林地は11m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13～14m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、計測本数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思わ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 (Fig. 3.2.11)。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 (2001) によると、スギ林では Watershed 手法は有効であったとしている。しかし、空中写真を判読する際の樹種判定基準 (大島ら 1962) 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 法では 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。

Table 3.2.6 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11 m 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 (2001) 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が、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

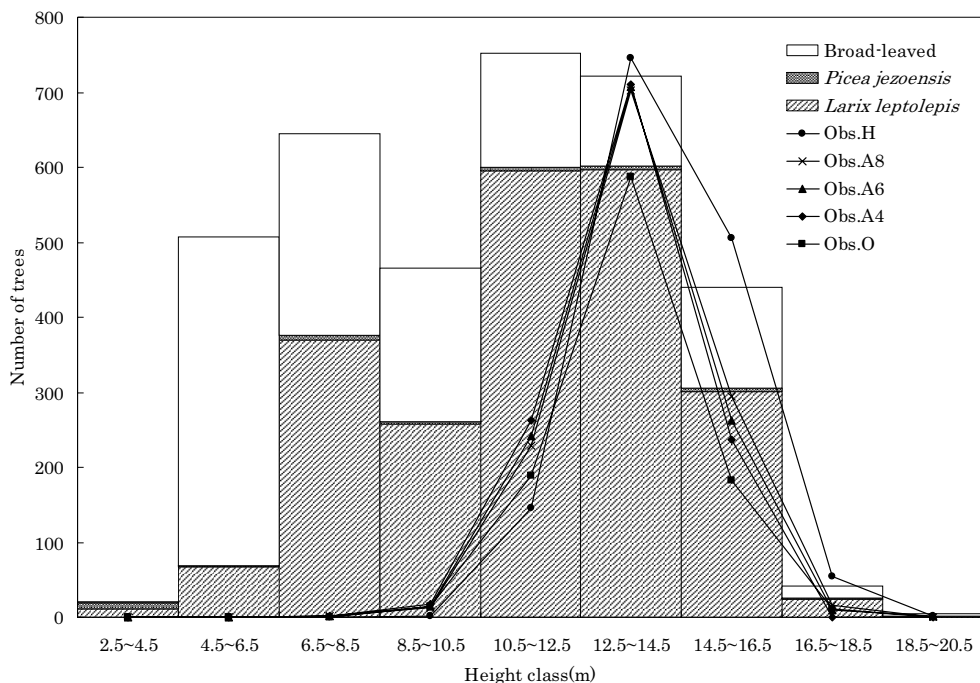


Fig.3.2.9. Histogram of total number of trees by height class in Plot A. Lines shows the lidar-derived histograms. Bars shows the histograms driven from complete enumeration.

外は過小評価される傾向は変わらなかった。

Table 3.2.7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11m 以上の平均上層木高誤差は、Plot A の Obs.H を除いて30cm 以内であった。Plot A の Obs.H については70cm 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・機器の違いや Obs.H の計測時はツルースの調査から2年経過しており、立木が成長したためなども推測される。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

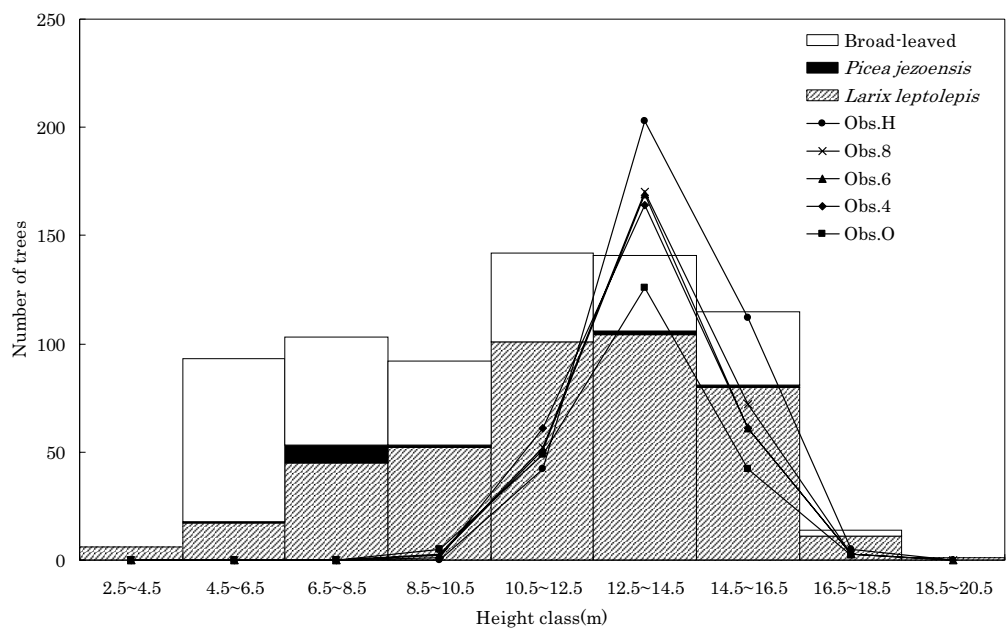


Fig.3.2.10. Histogram of total number of trees by height class, in Plot B. Lines shows the lidar-derived histograms. Bars shows the histograms driven from complete enumeration.

Table3.2.5. Number of trees derived from Lidar and complete enumeration.

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		466	
	Obs.O	224	32%	170	36%
	Obs.A4	290	41%	228	49%
	Obs.A6	286	40%	233	50%
	Obs.A8	300	42%	245	53%
	Obs.H	362	51%	320	69%

*Tree Height >=11

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 3.2.8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に調整されているためと考えられる。

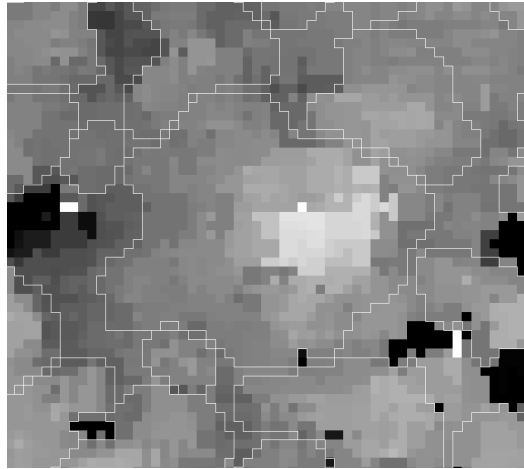


Fig.3.2.11. An example of extraction error. Shade image shows the altitude of DSM. White lines shows crown polygons derived from DSM. The central polygon contains 2 or 3 trees.

Table 3.2.6. 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 3.2.7. 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 3.2.8. Stem volume and Carbon weight estimated by aerial photographic analysis table.

Plot Name	Observation Name	Method of estimation	Average height of canopy trees		Number of canopy trees	Diameter of tree crown (m)	Stem Volume		Carbon weight	
			Score	Score			(m ³)	(%)	(tC/km ²)	(%)
Plot A	Truth	Measured data	13.44	563.00	-	-	148.92		4243	
		Volume table for aero-photographical analysys	132.9000	63.6339	83.9420		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	83.9420		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		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-photographical analysys	132.9000	63.6339	66.4705		132.90	87%	3523	79%
		Number of Canopy Trees	63.6339	66.4705			130.10	85%	3449	77%

3.3 航空機 Lidar を用いた林分構造解析による人工林のバイオマス計測

3.3.1 調査地および方法

3.3.1.1 検証林分と材積算出方法

調査は苫小牧市内にある国有林苫小牧1198林班を対象とした。林地は1958年に植栽されたカラマツ人工林で、ほかにエゾマツ、広葉樹などが侵入している。林床はオシダ、シラネワラビなどのシダ植物に低木のフッキソウが混生する植物によって占められ、一部ミヤコザサ、クマイザサが優占している。調査地には100m×100mのプロット（Plot C）を設定し、DBH 5 cm 以上の個体に対して1999年12月、2001年11月、2004年4月に毎木調査を行った。2004年4月の調査はその年の林分成長が始まる前に行ったため、2003年のデータであるとして解析を行った。樹高については各径級の代表木を測定し、樹高曲線式（3.3.1）を作成して全木にあてはめることにより求めた。

$$H = -4.481 + 6.117 \log D, \quad R^2 = 0.7703 \quad (3.3.1)$$

ここで、 H は樹高（m）、 D はDBH（cm）、 R^2 は決定係数を表す。

また立木幹材積は、胸高直径・樹高より幹材積表編成式を用いて求めた。カラマツについては北海道立木幹材積表編成式（中島 1948）を用い、エゾマツ・広葉樹については立木幹材積表（林野庁計画課 1970b）編成式を用いた。

（カラマツ）

$$\begin{aligned} FI &= 0.435719 + 0.515867/H + 2.481278/H^2 \\ F2 &= 0.439004 + 0.916461/D - 0.073809/D^2 \\ V &= \pi (D/200)^2 \times H \times (FI + F2)/2 \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

（エゾマツ）

$$V = 10^{(-4.0744 + 1.824080 \log D + 0.934568 \log H)} \times 1.0048 \quad (3.3.3)$$

（広葉樹）

$$\begin{aligned} V &= 10^{(-4.068644 + 1.756152 \log D + 0.906210 \log H)} \quad (D < 12) \\ V &= 10^{(-4.335395 + 1.903051 \log D + 1.025410 \log H)} \quad (12 \leq D < 22) \\ V &= 10^{(-4.332596 + 1.853014 \log D + 1.166956 \log H)} \quad (22 \leq D < 30) \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

V ：立木幹材積（ m^3 ） D ：胸高直径（cm）

H ：樹高（m）

Table 3.3.1. Flight data of lidar observations.

Flight Name	F1999	F2001	F2003
Flight Date	9~10 Sep 1999	26 Sep 2001	9 Sep 2003
Carrier Aircraft	Airborne	Heliborne	Heliborne
Altitude above Ground Level (m)	600	200 ~ 300	300
Pulse Density [First + Last Pulse] (m^{-2})	1.20	81.12	6.56

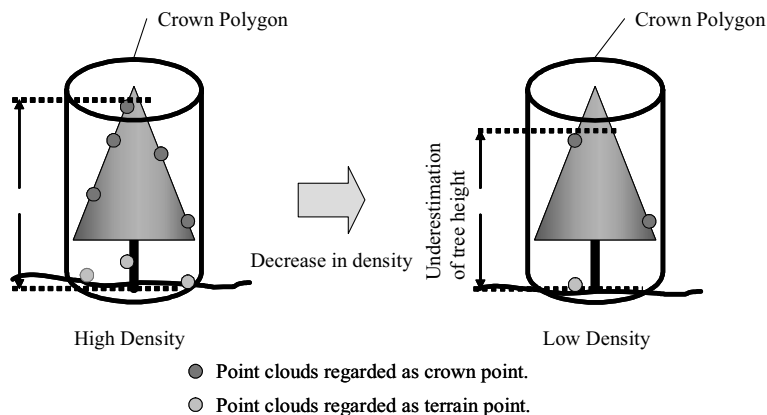


Fig. 3.3.1. Problem of tree height underestimation using lidar data.

3.3.1.2 計測条件と樹高補正方法

航空機 Lidar 計測は1999年、2001年、2003年に航空機搭載型、ヘリコプター搭載型 Lidar 装置により行った (Table3.3.1)。

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次元座標の点群として取得される。この点群をフィルタリング手法 (岡川 2003, Soinin 2003) を用いて、立木等のノイズを除去したものを地盤データとし0.5m Grid のDTM データを作成した。また、各Grid中の最も高い標高の点データは樹冠上部の標高であると考え、0.5m 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DCHMを作成し、DCHMからWatershed アルゴリズムを用いて樹冠の抽出を行った。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、樹冠ポリゴンとしポリゴン内にある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て、その標高からDTM標高を引いた値を計測樹高とした。この時計測される樹高は過小評価傾向にある。これはレーザが必ずしも梢端に当たるとは限らず、点密度が下がるにつれ梢端に当たる確率も減少するためである (Fig.3.3.1)。

このため、パルス密度の異なる航空機 Lidar データを用いて時系列解析を行う際には、この計測密度に依存した過小評価傾向を補正する必要がある。

そこで、本章では次の式を用いて補正を行うこととした。

$$H_c = A + B \times H_s \quad (3.3.5)$$

ここで、 H_c は補正樹高 (m)、 H_s は Lidar により計測された樹高 (m)、 A と B は係数であり、この係数は2001年の計測データから作成した。2001年の航空機 Lidar 計測では、 81.12m^{-2} と非常に高い密度でデータを取得しているため、このデータから得られる樹高は真値 (H) であると仮定し、このデータを1999

年、2003年と同じ 1.20m^{-2} 、 6.56m^{-2} に間引いた時の計測樹高 (H_s) との関係から、この A 、 B を求めた。

各計測年の林分材積は、この補正樹高 (H_c) から式 (3.3.1) を用いて DBH を算出、式 (3.3.2) を用いて単木材積を算出し、積算することで林分の材積とした。

3.3.1.3 下層木の推定方法

森林域での航空機計測においては、下層木の計測困難性の克服が大きな課題である。そこで本章では、航空機で計測の容易な上層木の構成から下層木の構成を推定することで解決を図ることとした。その方法として、Osawa ら (Osawa and Abaimov 2001a, Osawa *et al.* 2001b) の手法を用いることとした。Osawa らの手法は、ある同齢林分においてその全材積・個体重をサイズの大きなものから一部のみのデータを MNY 法 (Hozumi *et al.* 1968) を用いて推定する方法である。MNY 法は計測データをベータ関数にフィッティング (Hozumi 1971) することで、全個体の材積・重量を求める手法である。この MNY 法を航空機 Lidar 計測の結果に使用することで、下層木も含めた林分の材積・炭素重量を求めることが可能になると考えられる。

MNY 法の計算手順を以下に示す。 w をある個体の材積、 $w_{\max}$ を林分中の最大個体材積、 $\phi(w)$ を林分中の個体材積の分布関数とし、次の様に関数を定義する (Osawa and Abaimov 2001a)。

$$Y(w) = \int_w^{w_{\max}} w \phi(w) dw \quad (3.3.6)$$

$$N(w) = \int_w^{w_{\max}} \phi(w) dw \quad (3.3.7)$$

$$M(w) = \frac{Y(w)}{N(w)} \quad (3.3.8)$$

Table 3.3.2. Total number and stem volume by complete enumeration.

Investigate Name	P1999	P2001	P2003
Investigate Date	Dec 1999	Sep 2001	Apr 2004
Total Number of Trees (ha^{-1})	1028	1036	1009
Total Stem Volume(m^3ha^{-1})	145.43	156.27	162.90

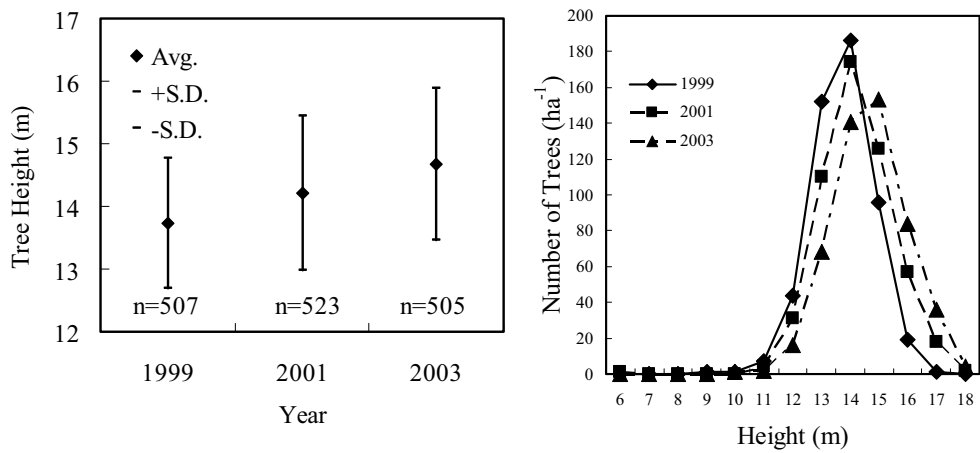


Fig. 3.3.2. Average (left) and Histogram (right) of tree height derived from lidar.

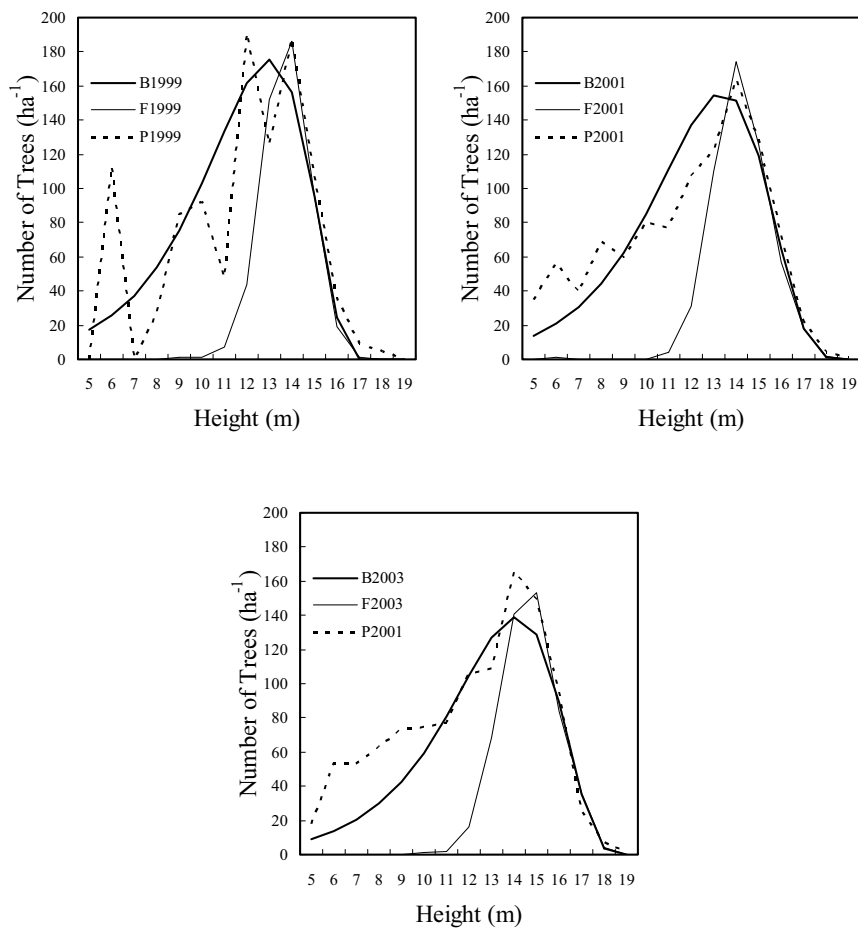


Fig. 3.3.3. Histogram of tree heights. Dotted lines (P), thin lines (F) and thick lines (B) are as a result of complete enumeration, laser survey and prediction from laser survey using the MNY method.

$Y(w)$ と $M(w)$ の関係から、フィッティングに適した分布関数のタイプとパラメータを得ることができる。たとえば、 w がベータ分布に従うなら、次の二つの関係式が成り立つ。

$$M(w) = Aw + B \quad (3.3.9)$$

$$N(w)^{(1-A)/A} = \frac{C}{A^{(1-A)/A}} (A-1) w + \left(\frac{C}{A}\right)^{(1-A)/A} \quad (3.3.10)$$

ここで A 、 B 、 C はパラメータである (Hozumi 1971, Osawa and Abaimov 2001a)。この時密度分布関数は次のようになる (Hozumi 1971, Osawa and Abaimov 2001a)。

$$\phi(w) = C \{(A-1)w + B\}^{(2A-1)/(1-A)} \quad (3.3.11)$$

林分の総材積は w を林分の最小個体重に置き換えることで、式 (3.3.6) と式 (3.3.11) から求めることができる。本章では、毎木調査での最低 DBH である 5 cm の個体重を w として使用した。

3.3.2 結果と考察

毎木調査の結果を Table 3.3.2 に示す。総個体数

は 1020 本前後で推移しており、総材積は増加する傾向にあった。

2001 年の航空機 Lidar データから作成した 1999 年と 2003 年の樹高補正式は、それぞれ次の通りであった。

$$Hc = 7.755 \times 10^{-1} Hs + 3.635, \quad R^2 = 0.7419 \quad (3.3.12)$$

$$Hc = 9.738 \times 10^{-1} Hs + 5.851, \quad R^2 = 0.9650 \quad (3.3.13)$$

パルス密度が 6.56 m^{-2} と高い式 (3.3.13) においては補正式も高い当てはまりを示したが、パルス密度が 1.20 m^{-2} と低い式 (3.3.13) においては補正式の当てはまりも低下していた。これは、パルス密度が低いと樹高の計測精度も低下するため、補正式の当てはまりも低下したと考えられる。上記の式で補正した Lidar による林分上層木の平均樹高と樹高階別本数を Fig. 3.3.2 に示す。年次間の平均樹高の間には有意な差がみられ (一元配置分散分析, $P < 0.01$)、樹高の年平均伸張量は $0.23 \sim 0.25 \text{ m} \cdot \text{year}^{-1}$ であった。本調査地に隣接する 1197 林班にてカラマツ 10 本を伐倒し、被圧木を除く 9 本について梢端の分枝点間距離から年あたりの伸張量を調査したところ $0.25 \pm 0.05 \text{ m} \cdot \text{year}^{-1}$ であったことから、本手法による林分樹高の成長量計測は有効な手法であると考えられる。

次に、毎木調査・航空機 Lidar・航空機 Lidar と MNY 法による樹高階別本数を Fig. 3.3.3 に示す。航空機 Lidar により計測できた個体は上層木のみであ

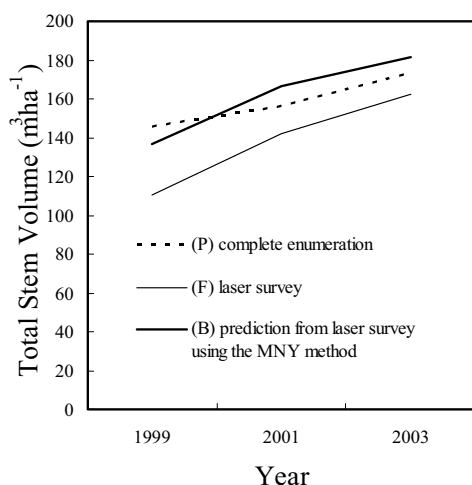


Fig. 3.3.4. Estimated total stem volumes. Dotted lines (P), thin lines (F) and thick lines (B) are a result of complete enumeration, laser survey and prediction from laser survey using the MNY method.

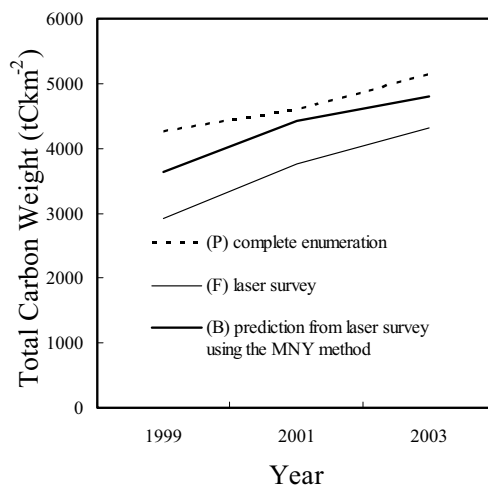


Fig. 3.3.5. Estimated total carbon weights. Dotted lines (P), thin lines (F) and thick lines (B) are a result of complete enumeration, laser survey and prediction from laser survey using the MNY method.

り、林分材積は過小評価される傾向があった。しかし MNY 法を適用したところ、その推定分布様式は毎木調査によって得られた分布様式と近い結果となった。また、推定林分材積・炭素重量を Fig. 3.3.4, Fig. 3.3.5 に示す。林分材積は Lidar 計測結果に MNY 法を適用することで、Lidar 計測の過小評価傾向が改善された。一方、炭素重量は過小評価傾向が残った。これは本林分では単位材積あたりの炭素重量が重い広葉樹が混交しているが、全てを軽いカラマツと仮定したためと考えられる。Lidar 計測の精度向上のためには、樹種判定も組み合わせた方法の開発が必要であると考

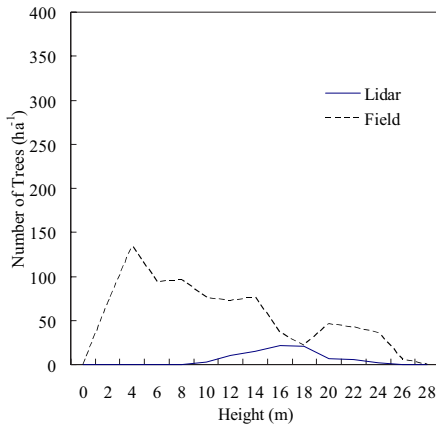
えられた。しかしながら、本手法による方法のみでも林分材積・炭素重量共に毎木調査による林分材積に近い結果を得ることができた。

3.4 航空機 Lidar を用いた天然林のバイオマス計測

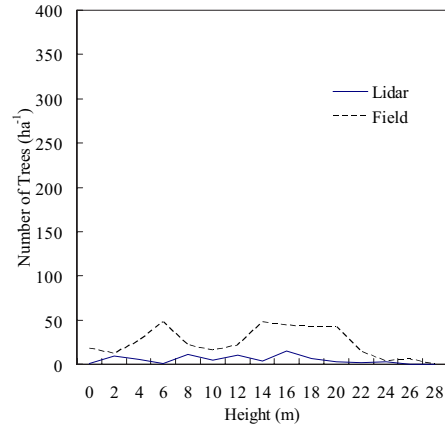
3.4.1 検証林分と材積算出方法

調査は、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター天塩研究林（幌延町字間寒別）に設定されている 4 つの長期観察林（6, 12, 16, 20 号）データを用いた。16 号が針葉樹林、それ以外は針広混交林に分類されており、すべて択伐履歴のある林分である。

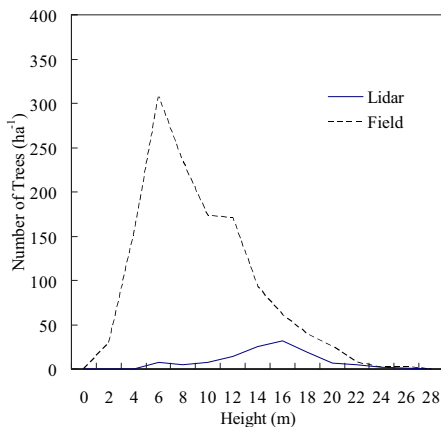
Plot 6



Plot 12



Plot 16



Plot 20

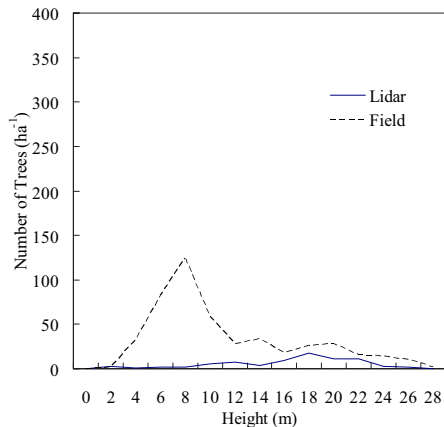


Fig. 3.4.1. Histogram of tree heights. Dotted lines (Field) and thin lines (Lidar) are as a result of complete enumeration and laser survey.

観察林の位置はGPSによるスタティック測量により決定し、観察林内の単木位置はトータルステーション（光波測距計：GTS-703F, Topcon）を用いて多角測量により決定した。観察林16、20号における単木計測は胸高直径6 cm以上の個体を対象にしており、超音波式樹高測定機（VERTEX III, Haglof）を用いて樹高を測定した。胸高直径はコンベックスを用いて測定した。単木材積（ V ： m^3 ）は、中島式の針葉樹と広葉樹の材積式(2)を用いて樹高（ H ：m）と胸高直径（ D ：cm）から(3.4.1)式により算出し、その総和を森林蓄積量とした。

$$V = \pi (D/200)^2 \times H \times c \tag{3.4.1}$$

ここで、 c は樹幹係数で(3.4.2)式より算出される。

$$c = (F_1 + F_2) / 2 \tag{3.4.2}$$

F_1 、 F_2 はそれぞれ樹高階別樹幹係数と直径階別樹幹係数で、(3.4.3)式より算出される。

$$\begin{aligned} F_1 &= 0.61 - 0.0055 H + 5.48 e^{-1.025 H} && (\text{針葉樹}) \\ F_1 &= 0.515 - 0.03 H + 2.814 e^{-0.550 H} && (\text{広葉樹}) \\ F_2 &= 0.5 - 0.0008 D + 0.4210 e^{-0.12 D} && (\text{針葉樹}) \\ F_2 &= 0.48 - 0.00066 D + 1.216 e^{-0.405 D} && (\text{広葉樹}) \end{aligned} \tag{3.4.3}$$

観察林6号・12号では樹高の計測を行っていないため、天塩研究林において地区毎に設定されている既存の樹高曲線（地区毎に針葉樹2種類、広葉樹2種類：以下天塩研究林標準樹高曲線とする）を用いて胸高直径から樹高を推定した。

解析に用いた航空機Lidarデータは、2004年8、9月に測定されたものである。測定された点群から立木等のノイズを除去したものを地表面標高データとし、DTM（Digital Terrain Model）データを作成した。また、全ての点群データからメッシュ内の最大標高値を抽出し、平滑化処理を行うことで樹冠表面のDSM（Digital Surface Model）データを作成した。DSMからDTMを引いた値（DCHM：Digital Canopy Height Model）を樹高の比較に用いた。メッシュの大きさは2002年が2 m × 2 mで、2004年が1 m × 1 mである。

Table 3.4.1. Estimated stem volume (m^3ha^{-1}).

Plot No	Complete Enumeration	Estimated	
		Coniferous	Broad-Leaved
6	275	39	179
12	173	23	104
16	208	49	215
20	230	47	244

3.4.2 Lidar データ解析方法

樹冠の抽出には3.3.2と同様に Watershed 法を用い、樹冠ポリゴンを作成、ポリゴン内のDCHMの最大値を樹高とした。樹高から天塩研究林標準樹高曲線を用いて胸高直径を算出し、式(3.4.1)～(3.4.3)を用いて単木材積を算出し、全ての樹冠ポリゴンの単木

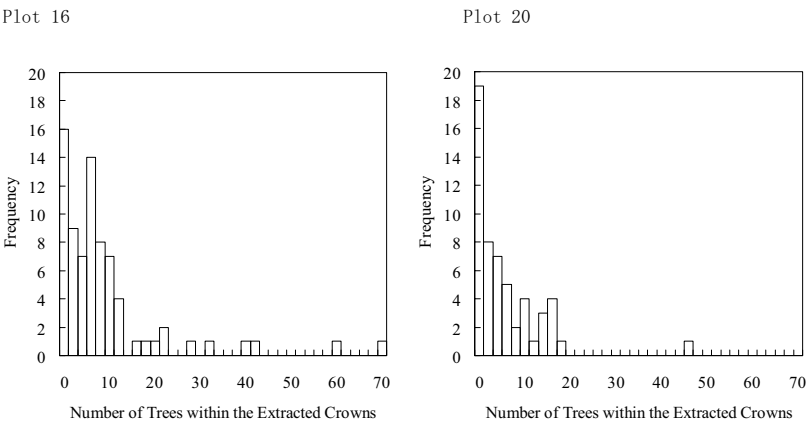


Fig. 3.4.2. Number of trees within the extracted crowns.

材積を積算することで林分材積を求めた。Lidar 計測では針葉樹・広葉樹の判別が困難なため、全て針葉樹であると仮定した場合とすべて広葉樹であると仮定して林分材積を求めた。

3.4.3 結果と考察

各観察林について、毎木調査を用いた樹高階別本数と Lidar を用いた樹高階別本数を Fig 3.4.1 に示す。Lidar 計測から抽出された立木本数は、上層木から下層木まで過小に評価されている。これは、下層木が計測できないものの、上層木は計測可能であったカラマツ人工林の結果とは異なっている。そこで、立木位置の測定されている観察林16号・20号について、Watershed 法で抽出した樹冠ポリゴンの範囲に含まれる立木の本数の頻度分布を Fig. 3.4.2 に示した。これによると、抽出した樹冠の中に多数の立木が含まれていることがわかる。この原因として、1つの樹冠内に下層木も含まれていることの他に、複数の上層木が含まれていることが考えられる。Watershed 法ではピークが不明瞭なデータの場合誤抽出が増加する。当観察林では梢端の不明瞭な広葉樹が上層木を占めている一方、針葉樹についても倒木・ギャップ更新等により群状に群生しているため、誤抽出が増加したものと考えられる。Table 3.4.1 に、単木法で推定した各観察林の林分材積を示す。これによるとすべて針葉樹と仮定した場合は過小評価、広葉樹と仮定した場合は毎木調査と近い値になっている。これは樹高曲線を使った場合、同一樹高だと針葉樹より広葉樹の方が胸高直径が大きくなる傾向があり、結果的に林分材積が大きくなるためである。しかし、実際には観察林は広葉樹林ではないため、この広葉樹のみという極端な仮定はあてはまらないと考えられる。

以上より、天然林における単木抽出法は複数樹木を少ない本数に誤認する傾向にあり、抽出した本数・林分材積共に過小評価がなされることが明かになった。

3.5 まとめ

本章では、主に人工林におけるバイオマス計測を行うことを目的に、航空機 Lidar データから Watershed 法による単木抽出を行う方法の検討を行い、以下のような成果が得られた。

- 1) パルスの密度1.4m 以下、フットプリントサイズ 0.05~0.24m の航空機 Lidar 計測は、カラマツ人

工林の林分平均樹高の計測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ある傾向が確かめられた。
- 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、上層木をみの計測値でも林分材積を比較的よく推定することができた。
- 4) 計測樹高に対して樹高補正式を作成することで林分の樹高成長計測が可能であることが示され、計測精度を向上させることがあきらかになった。
- 5) MNY 法を用いることで下層木の樹高階別本数を推定することが可能となり、計測材積の過小評価傾向が改善され林分材積の成長量計測が可能となることが示された。
- 6) 天然林においては、樹冠個数が過小に抽出される傾向にあった。

単木の抽出に Watershed 法を用いているが、天然林の抽出精度を上げるためにはさらなる高密度化が必要となる。しかし、それは計測コストの上昇を招くため、広域の調査が困難になると考えられる。単木認識の必要がない手法でのバイオマス計測手法の検討が必要と考えられる。

第4章 「森林体積法」を用いた航空機 Lidar による計測と航空写真による時系列解析

4.1 はじめに

第3章では Lidar を用いた単木法によるバイオマス計測手法の検討を行ったが、天然林においては単木の抽出本数・材積が過小に計測されるという課題が残った。そこで本章では、天然林に対する Lidar 計測手法として、DSM と DTM に挟まれた空間の体積である森林体積を用いたバイオマス推定手法の検討をおこなう (4.2)。また、過去からの森林変化とバイオマスを計測するため、過去に撮影された航空写真を利用する方法を検討した。ステレオマッチング手法を用いて DSM を発生させ、その変化から森林変化の抽出を試み、さらに森林体積を用いたバイオマス推定手法の検討である (4.3)。

Table 4.2.1. Test site description.

Plot Name	Forest Type	Species	Area (ha)	Number of Trees (ha ⁻¹)	Investigated Year	Year of Lidar Surveying
LTER #05	Coniferous	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea glehnii</i>	0.48	777	1999	2004
LTER #06	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea jezoensis</i> , <i>Betula</i> Spp.	0.5	806	1999	2004
LTER #11	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Sorbus commixta</i>	0.49	720	2002	2004
LTER #15	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Sorbus commixta</i>	0.5	626	2003	2004
LTER #16	Coniferous	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea glehnii</i>	0.51	1294	2004	2004
LTER #18	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea jezoensis</i> , <i>Acanthopanax sciadophylloides</i>	0.24	679	2004	2004
LTER #19	Coniferous	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea jezoensis</i>	0.34	706	2004	2004
LTER #20	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Betula</i> Spp.	0.5	474	2004	2004
CC-LaG #1	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Betula</i> Spp.	13.09	376	2000	2002
CC-LaG #2	Broad-leaved	<i>Salix</i> Spp., <i>Betula</i> Spp.	1.05	363	2002	2002
CC-LaG #3	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Betula</i> Spp.	0.97	182	2002	2002
CC-LaG #4	Mixed	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea jezoensis</i> , <i>Betula</i> Spp.	0.98	187	2002	2002

4.2 航空機 Lidar を用いた天然林バイオマス計測

4.2.1 調査地および方法

4.2.1.1 調査地

調査には、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター天塩研究林(幌延町字間寒別)に設定されている8つの長期観察林と4つの研究サイト(CC-LaG: Carbon Cycle and Larch Growth experiment サイト)を用いた(Table 4.2.1)。対象サイトの内8地点は針広混交林、3地点が針葉樹林、1地点が広葉樹

林に分類されており、すべて択伐履歴のある林分である。観察林の位置はGPSによるスタティック測量により決定し、観察林内の単木位置はトータルステーションを用いて測定した。観察林16、20号における単木計測は胸高直径6 cm以上の個体を対象にしており、超音波式樹高測定機(VERTEX III, Haglof)を用いて樹高を測定した。胸高直径はコンベックスを用いて測定した。単木材積は、式(3.4.1)～(3.4.3)を用いて算出し、その総和を林分材積とした。観察林5、

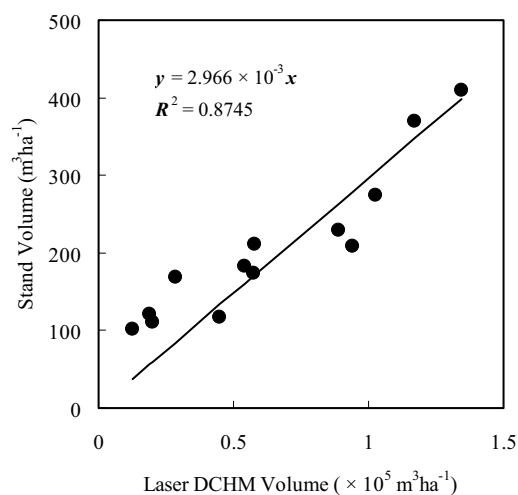


Fig. 4.2.1. Relationships between stem volumes and forest volumes, which is the space between the surface of the tree crown and the ground.

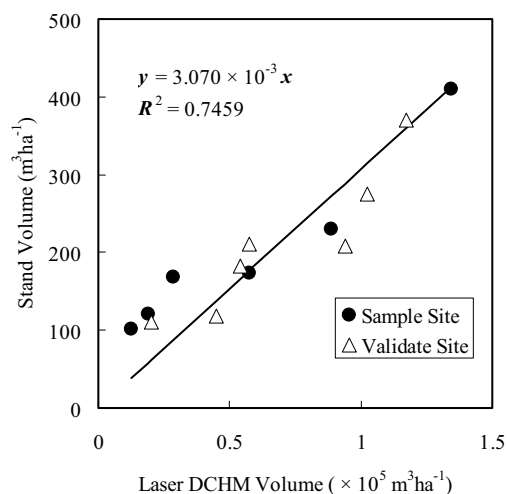


Fig. 4.2.2. Relationships between stem volumes and forest volumes for the validation.

6、11号および、CC-LaG サイト4 地点では樹高の計測を行っていないため、天塩研究林において地区毎に設定されている既存の樹高曲線（地区毎に針葉樹2種類、広葉樹2種類）を用いて、胸高直径から樹高を推定した。また CC-LaG サイト1-4では、胸高直径10cm 以上の個体を対象に材積の評価を行った。

4.2.1.2. 航空機 Lidar データの仕様及び地上データとの比較

解析に用いた航空機 Lidar データは3.4で用いた2004年8、9月のデータに追加して2002年8月のデータを使用して、DTM、DSM、DCHM を作成し、さらにプロット毎に DCHM 体積を計測、ha あたりの DCHM 体積を算出して森林体積とし、林分材積の比較に用いた。メッシュの大きさは2002年が2 m × 2 m で、2004年が1 m × 1 m である。

4.2.2 結果および考察

地上調査によって測定した林分材積と Lidar から得られた森林体積を比較した結果を Fig. 4.2.1 に示す。両者の相関は高く、航空機 Lidar によって天然の針広混交林における森林の林分材積を推定できる可能性が高いことが明らかになった。本手法の精度を検証するため、関係式作成用のデータを全データからラン

ダムに選択して再度関係式を作成したのが Fig. 4.2.2 である。この式を検証林分の森林体積に当てはめて林分材積を求めたところ、RMSE は42.0m³、誤差率の RMSE は25 %となった。

国有林における空中写真林分材積表の作成要領（林野庁計画課 1970a）によると、作成する材積表の誤差率は15%以内を目標に定めているが、多くは18%以上になるとしている。本手法による誤差率はこの目標を下回っているが、空中写真林分材積表は林相や地形・土壌等の因子も判読・利用を行っており、判読作業が膨大なものとなる。その点、本手法は自動化が可能な作業であり、広域計測に有益な手法であると考えられた。

4.3 航空写真を用いた時系列解析とバイオマス計測

4.3.2 調査地および方法

4.3.2.1 検証対象森林

調査は、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター森林圏ステーション中川研究林内の照査法試験地において行った。

照査法試験地は、北海道北部天然林を対象とする施業指針を探ることを目的として、1966年に北海道大学農学部林学科森林経理学教室（当時）と農学部附属演習林中川地方演習林（当時）と共同で設定され、以

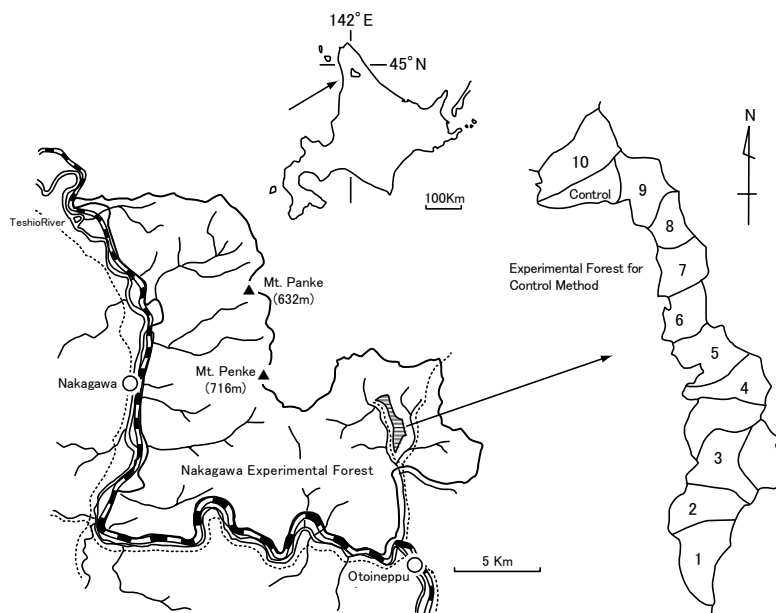


Fig. 4.3.1. Location of the site.

Table 4.3.1. Aerial Photograph Specification.

Date	Region#	Focal Length (mm)	Scale
Jun-1980	Yama-918	213.80	1:20,000
Sep-1986	86-1	213.80	1:20,000
Jun-1991	91-1	213.58	1:20,000
Aug-1996	96-1	214.88	1:20,000
Jul-2001	01-1	214.88	1:20,000

来約40年が経過している(大金ら 1988, 和ら 1998)。試験林の面積は124.33ha (うち施業対象区110.3ha)で、北海道中川郡音威子府村字上音威子府に位置し、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター森林圏ステーション中川研究林の208~211林班に属する(Fig. 4.3.1)。ここは天塩川の支流音威子府川の中流左岸に接し、斜面方位はおおむね西向きで、傾斜度は中、標高は40~220mである。土壌の質は大半が酸性褐色土を呈する。地質は中世代白亜紀の上部えぞ層群西知良志内層に属し、頁岩・泥岩から成る。本試験林では林班ごとに、各経理期の期首に蓄積調査ならびに収穫のための選木調査を実施している。そこでは胸

Table 4.3.2. The year of investigation. For example, the stem volume derived from aerial photo taken in 1981 can be verified with the result of complete enumeration in 1983; the felling information derived from aerial photo taken in 1986 can be verified with the record of felling in 1985, and so on

Year	Aerial Photo	Complete Enumeration	Felling	Verification
1981	○			} Stem Volume (1983)
1982				
1983		○		
1984				} Felling (1985)
1985			○	
1986	○			
1987				} Stem Volume (1993)
1988				
1989				
1990				} Felling (1995)
1991	○			
1992		○		
1993				} Stem Volume (2003)
1994				
1995			○	
1996	○			} Stem Volume (2003)
1997				
1998				
1999				} Stem Volume (2003)
2000				
2001	○			
2002		○		
2003				

高直径、12.5cm以上の立木(主木)について、高さ1.3m位置の胸高直径を5cm括約で輪尺を用いて測定し立木材積を求めている。この場合、各経理期における測定誤差を防ぐため、各林木の測定位置を赤ペンキで識している。また立木材積は、本試験林での実測による樹高曲線の数値と胸高直径から決定した経理表(立木幹材積表)を用いて求められている。本試験林の経理表は「北海道立木幹材積表」(中島 1948)にもとづき、トドマツ(*Abies sachalinensis*)・エゾマツ(*Picea jezonensis*)・アカエゾマツ(*Picea glehnii*)に適用される針葉樹(N1)、ウダイカンバ(*Betula maximowicziana*)・ハリギリ(*Betula maximowicziana*)・シナノキ(*Tilia japonica*)・ミズナラ(*Quercus mongolica*)・ヤチダモ(*Fraxinus mandshurica*)・カツラ(*Cercidiphyllum japonicum*)に適用される広葉樹1級(L1)、L1以外の広葉樹および針葉樹のイチイに適用される広葉樹2級(L2)に分けて作成し、それぞれの単木材積を求めている。

本研究は、照査法試験林の中で8小班(Plot CM: 6.72 ha)を対象に行った。毎木調査が1974・1983・1993年に胸高直径12.5cm以上の立木について行われ、それらの次の年である1975・1985・1995年に択伐作業が行われている。また個体位置については2000年にトータルステーションを用い、調査時に存在していた立木について座標が計測されている。また、すでに死亡(伐採・自然枯死)していた個体についても、2000年~2002年に切株や倒木を探すことにより位置が特定されている。この調査により、胸高断面積合計(BA)比で全死亡個体の80%が特定されている(Noguchi and Yoshida 2005)。また、対象林分の材積は、中川照査法試験林経理表(大金ら 1988)により胸高直径から求めた。

4.3.2.2 解析および検証方法

写真測量調査には1980・1986・1991・1996・2001年撮影の航空写真を使用した(Table 4.3.1)。対象林を含む航空写真ポジフィルムを20ミクロンでスキャンし、地上分解能約40cmのデジタル画像を作成した。

2002年に取得した航空機Lidarデータ(パルス密度 1.04m^{-2})からフィルタリングを行い、DTM、DSMを作成した。このDSMデータを用い各航空写真上にGCPを設定し、外部標定を行い、ステレオペアマッチングを行うことで各年度のDSMを算出した。また、この各年度のDSMとLidarによるDTM

との差分を計算することで、各年度の DCHM を作成した。航空写真により作成した DSM の精度を検証するため、2001 年の航空写真 DSM と航空機 Lidar による DSM の間の誤差解析を行った。

現地調査による立木位置と写真測量解析による各種被覆の重なるの指標として、Morisita (1959) の $C\delta$ Index を用いた。被覆の検査に用いる $C\delta$ Index を $C\delta(p)$ とすると：

$$C\delta(p) = \frac{2 \sum_{i=1}^q P_{xi} P_{yi}}{(\delta_{(p)x} + \delta_{(p)y}) q^2 \bar{P}_x \bar{P}_y} \quad (4.3.1)$$

ここで、

$$\delta_{(p)x} = \frac{\sum_{i=1}^q P_{xi}^2}{q^2 (\bar{P}_x)^2}, \quad \delta_{(p)y} = \frac{\sum_{i=1}^q P_{yi}^2}{q^2 (\bar{P}_y)^2}$$

P_{xi} , P_{yi} = coverage in per cent of species X, Y in the i -the quadrat

$\bar{P}_x$, $\bar{P}_y$ = mean coverage of species X, Y

q = number of quadrat

となる。 $C\delta(p)$ は 0 からおよそ 1 までの値をとり、

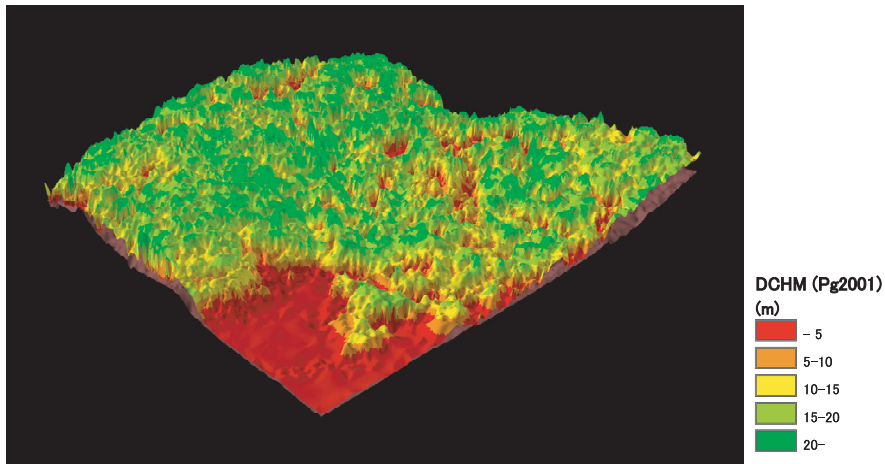


Plate 2. Bird-view of DSM derived from aerial photo.

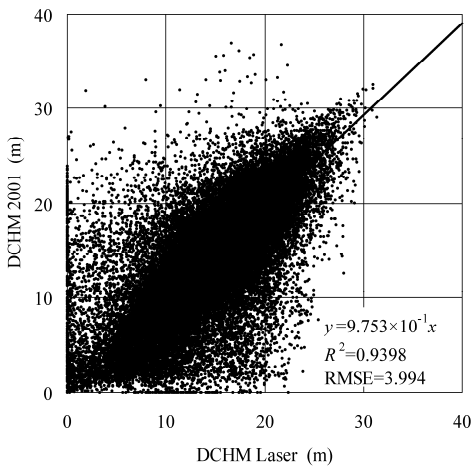


Fig 4.3.2. Comparison of DCHMs derived from Lidar and photogrammetry.

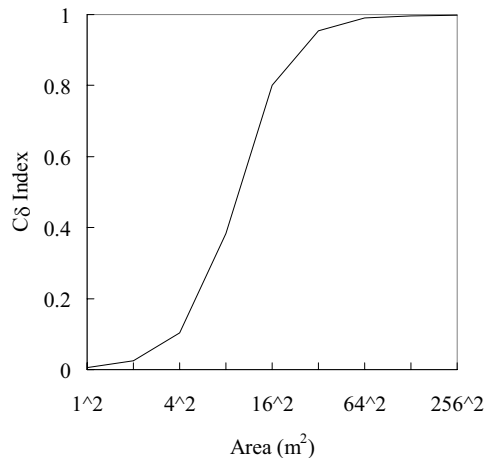


Fig. 4.3.3. $C\delta$ index of crown coverage and tree location. X-axis shows the area size of calculating $C\delta$ index.

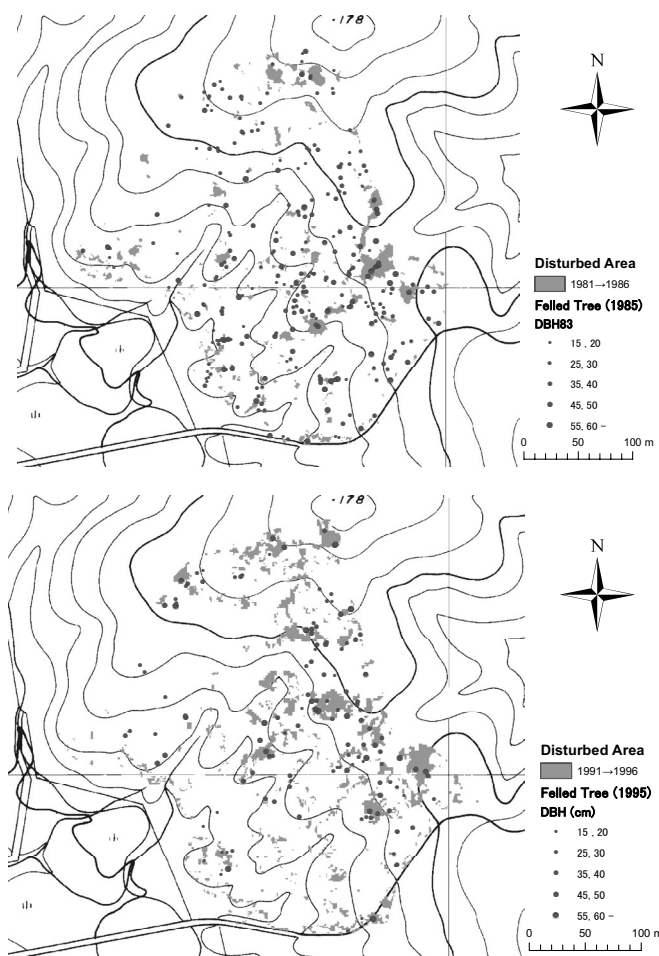


Fig. 4.3.4. Extinguished crown coverage derived from photogrammetry and location of felling. Upper: 1985
Lower: 1995.

1 の場合は X と Y の分布は重なっている。0 の場合は重なっていないことを表す。この $C\delta$ Index を用いて、写真測量によって抽出した樹冠エリアと立木位置の重なりを検出を行う。

航空写真撮影・毎木調査・伐採が行われたそれぞれの年次を Table 4.3.2 に示す。航空写真が撮影された 1981・1991・2001 と毎木調査の行われた 1983・1993・2003 年は、2 年のズレがあるが近い年次のため、それぞれの対応するものと考えて航空写真計測値と材積の関連についての検証を行った。また、1986・1996 年撮影の航空写真はそれぞれ 1985・1995 年の伐採直後の撮影と考え、航空写真計測値と伐採の関連についての検証を行った。

航空写真計測値と伐採の関連についての検証は、まず伐採直前の航空写真の $DCHM \geq 10m$ を樹冠層とし、伐採直後の航空写真については $DCHM < 5m$ を無立木と仮定し、伐採の前後で樹冠層→無立木となった場所を樹冠消滅域と定義した。次に、この樹冠消滅域と伐採木の位置との関係を $C\delta$ Index を用いて検証した。

DCHM から材積を算出するために材積式を作成した。材積式は、林分を 50m 四方のコドラートに分離して、コドラートごとの DCHM 体積と毎木調査による材積との間の回帰式を計算することにより作成した。本研究においては、Lidar 計測による材積式を算出し、これを過去の航空写真 DCHM 体積に当てはめ

ることで精度検証を行うこととした。

4.3.3 結果および考察

4.3.3.1 DCHM と現況の対応

Plate 2は、2001年の空中写真から作成したDSMおよび5 m毎のDCHMのクラス別に彩色した鳥瞰図を示す。樹冠の他、林冠ギャップが検出できていることがわかる。Plate 3には、21年間の樹冠標高変化量図を示した。樹冠標高差が0 m以下になっている場所は、新しく設けられた林道や択伐施業による伐採と考えられる。樹高成長が10m以上と大きな値を示す場所は、造林地などの若齢林や河畔林など成長の早い樹種で構成された林地や林道の周囲等で樹冠面積が拡大した場所であった。樹冠標高変化量図により森林施業の検出が容易にできることが示唆された。

4.3.3.2 写真測量の精度検証

2002年に取得したLidar計測によるDCHMを真値と仮定し、2001年撮影の航空写真によるDCHMの誤差解析を行ったのがFig. 4.3.2である。大きな誤差が発生している場所もあるが、誤差はRMSEで4 m程度であった。石渡ら（2004）は、高山で林野庁/県庁撮影の航空写真を用いた航空写真測量の精度検証を道路上の検証点データを用いて行っているが、その誤差は0.45～1.65mであると報告しており、本研究での誤差はこの値より大きい結果となった。この理由として、道路等凹凸度の小さい地物を対象とした写真測量の成果では、平面方向の誤差が標高方向の誤差に

与える影響が少ないのに対し、森林の様な凹凸度の大きな地物を対象とした場合、平面方向の誤差が標高方向の誤差に与える影響が大きいと考えられる。しかしながら、Fig. 4.3.2の回帰直線の傾きはほぼ1を示すことから、4 m程度の誤差を含むものの、航空写真から森林のDCHMが再現できることが明らかとなった。

4.3.3.3 樹冠部の検出

Plate 4には、2001年の航空写真によるDCHMのクラス別と立木位置図を示す。樹冠高の平面分布と、立木位置が重なっていることを読み取ることができる。Fig. 4.3.3には、樹冠エリア（DCHM ≥ 10m）の被覆度と立木の胸高断面の被覆度の間でCδ Indexを計算した結果を示す。これによるとCδ Indexは、面積が約102m²以上の場合0.5以上の相関関係を示しており、このスケールで見た場合、お互いの分布は重なっていることがわかる。このことから、DCHMは立木の平面分布を表していると考えることができる。

4.3.3.4 伐採木の検出

Fig. 4.3.4にDSMの変化量から検出した樹冠消滅範囲と、その間に伐採された伐採木の位置を示す。樹冠消失範囲と伐採木の位置が対応していることがわかる。Fig. 4.3.5には、樹冠消失範囲の被覆度と伐採木の胸高断面の被覆度の間でCδ Indexを計算した

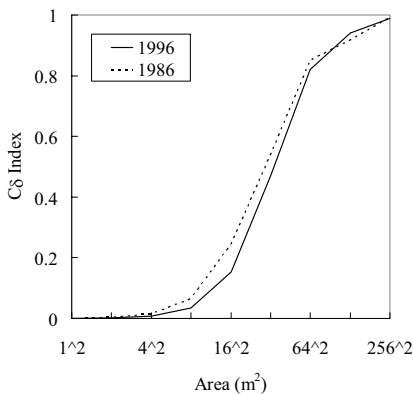


Fig. 4.3.5. Cδ index of extinguished crown coverage and stump location. X-axis shows the area size of calculating Cδ index.

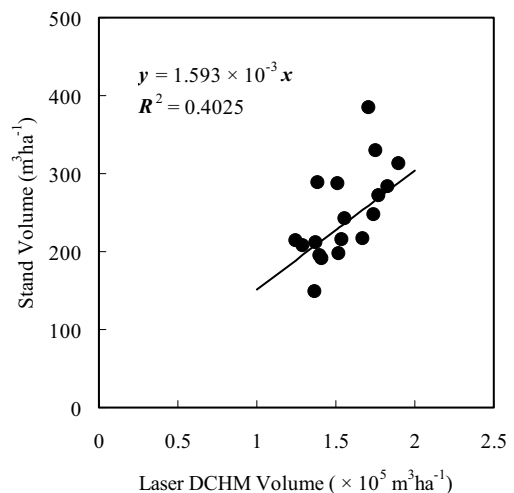


Fig. 4.3.6. Relationships between stem volumes and forest volumes.

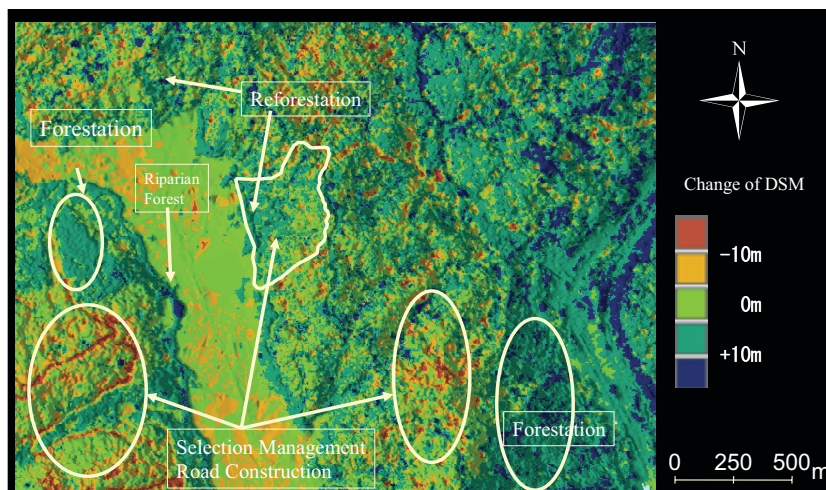


Plate 3. Amount of change in DSM and its situation (1980→2001) .

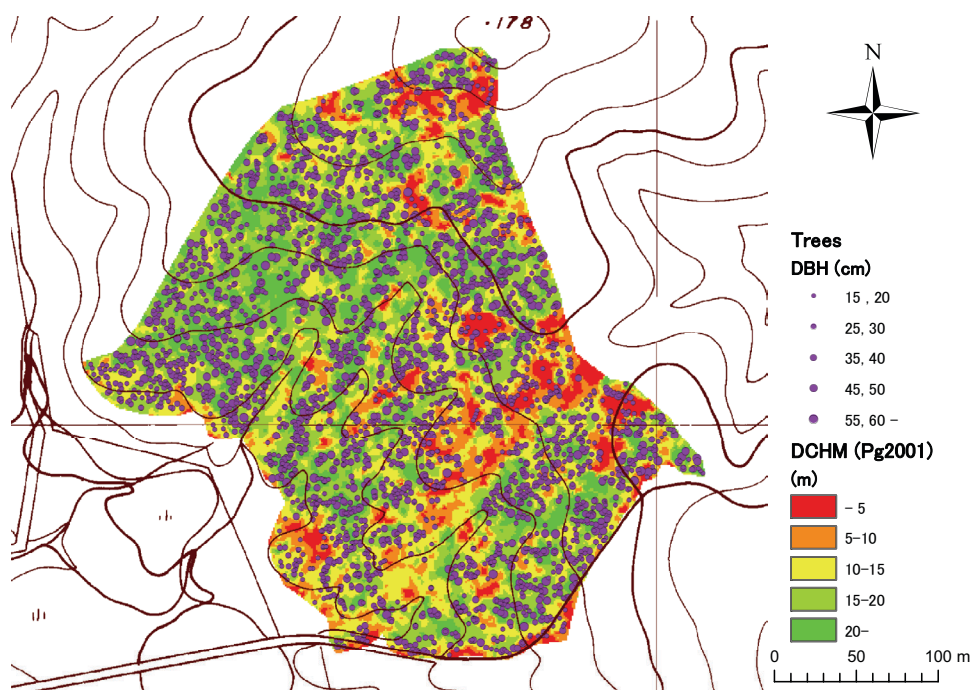


Plate 4. DCHM and location of trees. Small dots show the locations of trees and its DBH. Color coverage shows the dchm value derived from aerial photo in 2001.

結果をしめす。これによると $C\delta$ Index は、面積が約 502m^2 以上の場合 0.5 以上の相関関係を示しており、このスケールで見た場合、お互いの分布は重なっていることがわかる。面積が約 502m^2 以下の場合、被覆

の相関が悪くなっている。これは、特に斜面の広葉樹では根本位置が樹冠範囲の外に存在するものもあることから、根本位置と樹冠中心の平面座標が必ずしも一致しないためと考えられる。

4.3.3.5 バイオマスの推定

Fig. 4.3.6に、2002年のLidar計測による森林体積とhaあたり材積の間の回帰式を示す。双方の間には相関関係がみられ、本森林においても森林体積から林分材積を求めることが可能であることが明らかになった。この回帰式を2001・1991・1980年の航空写真による森林体積に適用して材積を求めると、それぞれ誤差のRMSEは $39.93 \cdot 66.49 \cdot 52.43 \text{m}^3$ 、誤差率のRMSEは $16.8\% \cdot 21.4\% \cdot 23.7\%$ となった。誤差率は空中写真林分材積表の目標値より大きいが、Lidar計測と同様に過去の森林についても森林体積から材積を求めることができることが明らかになった。

4.3 まとめ

森林体積と林分材積の相関式を作成することで、単本法の適用が困難な天然林においても精度の高い林分材積を求めることが可能になった。林分材積と森林体積の相関式の係数は天塩研究林ではおよそ0.0030となり、中川研究林のおよそ0.0015の倍の値になった。帝国森林会（1936）は、Tharandt演習林のカラマツ林で航空写真にて計測を行った林冠断面積から森林体積を推定し、林分材積を求めた事例を紹介しているが、その係数は0.0013～0.0020としている。これに比べ、中川研究林の値はカラマツ林の事例に近い値となったが、天塩研究林の値は過大な値となった。天塩研究林にてLidar計測と森林体積・樹高の関係について研究を行った高橋ら（2006）によると、天塩研究林では林床のササ密度が高くレーザ光が届かないため、Lidar計測ではササ群落高より下部の蓄積を評価できていないとしている。つまり、ササ密度の高い場所では、森林体積がササ群落高より下部の体積分だけ過小となるため係数が大きくなると考えられる。また、森林体積と林分材積の決定係数（ R^2 ）で比較を行うと、天塩研究林の林分より中川研究林の林分の方がばらつき傾向にあった。これは、天塩研究林の林分は比較的凹凸度の小さい林地にプロットを設定している一方、中川研究林の林分は凹凸多い林地全体を対象としているためDTMの計測精度のばらつき、つまり森林体積の計測精度のばらつきがあるためと考えられる。今後、本手法の精度向上は、森林体積と林分材積の相関式を作成するための地上調査地点を増やすことで可能と考えられるが、これまでに相関式を作成するための地上調査は行われたことがほとんどなく、既存のデータを用いることは不可能である。このため、本手法の適用に

あたっては計測毎に地上調査を行うか、空中写真林分材積表と同様な材積表として調製する必要がある。いずれにしても、多くの地上調査を行わなければならないという課題が残った。しかし、本手法はLidarデータの解析が簡単であり自動化が可能な手法であるため、広域の計測に有効な手法であると考えられる。

本章では、天然林における広域バイオマス計測と時系列変化を求めることを目的としてDCHMおよび森林体積に着目して解析を行うことで、下記の成果が得られた。

- 1) 航空機Lidar計測から容易に算出することができ森林体積を用いることで、天然林においても精度の高い林分材積を求めることが可能になった。
- 2) 過去の航空写真からDSMを作成し、航空機Lidarから求めたDTMと組み合わせることで、過去のDCHM分布を計測することが可能となった。また、過去のDCHMの分布は立木位置の分布を反映しており、その変化を求めることで森林施業の状態で伐採・成長を定性的に把握することが可能となった。
- 3) 過去のDCHM分布から森林体積を求めることで、過去の林分材積と推移を把握することが可能となった。

第5章 地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測

5.1 はじめに

本章では「リモートセンシングのグラウンドトゥールズとして使用する」現地林分調査を精度良く容易に行う方法を検討する。本章の「5.2 地上レーザスキャナを用いた単木の計測」では地上レーザスキャナによる方法を検証するが、傾斜地での胸高直径の計測や上部直径などの計測に利用できない課題を解決するため、本研究ではスキャナにより計測された点群を円柱でモデル化する手法を開発し、胸高直径・立木位置の計測精度および単木の積み上げとしての林分材積の計測精度の検証を行うこととした。また、それと合わせて、異なる二機種の上地上レーザスキャナ間の精度検証も行う。「5.3 地上レーザスキャナを用いた林分材積の計測」では、地上レーザスキャナによる林分材積の計測方法の研究を行った。従来方法では樹高曲線や完満度を表す胸高形数を林分毎に作成する必要があるが、また複数点からの計測データを正確に接合するのが困難という課題があった。本研究では箕輪法の理論

Table 5.2.1. Specification of Cyrax2500 and LMS-Z210.

Name	Cyrax2500	LMS-Z210
Developed by	Cyra Technologies	RIEGL Laser Measurement Systems
Precision (Vertical)	±6mm(1.5m~50m)	25mm
Precision (Distance)	±4mm	±25mm
Measurement Range	Max 100m (1.5m ~ 50m Recommended)	2m ~ 350m
Scanning Range	40°(Horizontal)×40°(Vertical)	330°(Horizontal)×80°(Vertical)
Scanning Rate	1000 points/sec.	MAX 20000 points/sec.
Laser Spot Size	≤6mm(0m~50m)	≤50mm(0m~50m)
Wave Length	532nm	900nm
Laser Class	Class 2	Class 1
Software	Cyclone3.0	3DRiSCAN

Modified from Tashiro (2001)



Fig. 5.2.1. Cyrax2500.



Fig. 5.2.2. RIEGL LMS-Z210.

を用いて地上レーザスキャナデータを処理する手法の開発を行うことで先の課題を解決し、その計測値の精度検証を行った。「5.4 写真を用いた単木解析」ではなるべく安価に計測できることを目標に、写真測量を利用した計測方法の研究を行った。写真を利用した解析方法については、回転カメラによる立木位置・胸高直径の測定方法(鷹尾 1991)やデジタルスティルカメラによる地形形状の測定方法(柴崎 1993)が検討されている。この項では、写真画像と実体の関連付けが容易な魚眼レンズを利用した写真測量による森林調査への可能性について、測定誤差や測定に要する人員・時間の観点から検討を行った。「5.5 写真を用い

た林分解析」では、人的な解析作業の負担をかるくするため写真測量による自動マッチング手法と箕輪法を組み合わせた方法の研究を行い、材積の計測精度検証を行った。

5.2 地上レーザスキャナを用いた単木解析

5.2.1 レーザスキャナおよびデータ処理方法

対象森林の計測には、Cyra Technologies 社 Cyrax2500 (Fig. 5.2.1) および RIEGL 社 LMS-Z210 (Fig. 5.2.2) を使用した。Table 5.2.1に両スキャナの主な特徴を表す。両者の特徴を比較すると、LMS-Z210は広範囲のデータ取得を高速に取得するこ

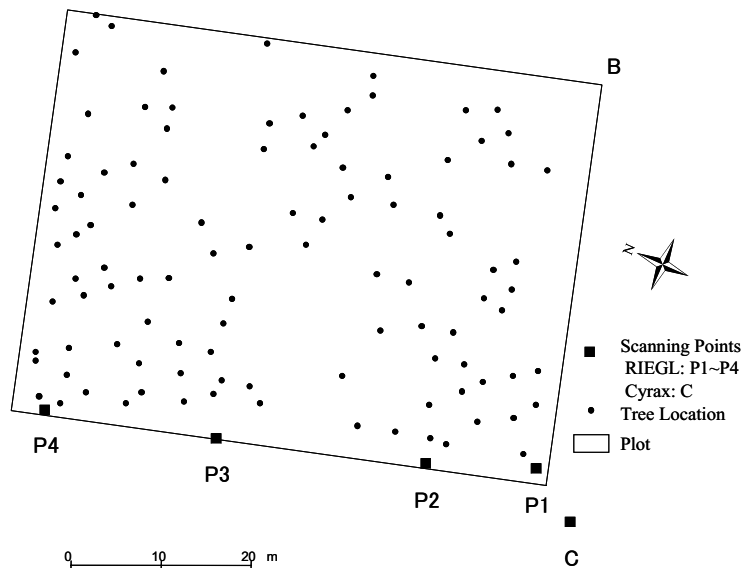


Fig. 5.2.3. Tree location and scanning points.

とができるのに対し、Cyrax2500は限られた範囲を高精度に取得できるのが特徴である（田代 2001）。また両レーザスキャナには、スキャナ操作及びデータ取得のためのソフトウェアがあり、データの解析・処理などの機能も備えている。Cyrax2500用ソフトウェアはCyclone3.0、LMS-Z210用ソフトウェアは3DRiSCANである。3DRiSCANは複数観測データの座標登録・座標変換・データフィルタ機能を持つが、点群データを直方体や円柱などの3Dモデルに化機能は持っていない。Cycloneは、これらの機能に加え汎用の3Dモデル化機能を装備している。今回計測された点群データは、Cyclone・RIEGL共にCyclone3.0によって3Dモデル化処理を行った。

5.2.2 調査地の概要

検証は、茨城県つくば市にある国立環境研究所敷地内のアカマツ林(*Pinus densiflora*)において行った。林内に60m×45mのプロットを設定し、DBH（胸高直径）8 cm以上の個体について立木位置、DBHを測定した。また、DBH階級別の代表木について樹高を測定した。DBHは調査者の胸高（地上約1.2m）の位置にてエスロン製巻尺を用いて測定し、立木位置はトータルステーションを用いて計測した（Fig. 5.2.3）。トータルステーションの反射鏡は立木胸高位

置の一定方位に密着させ計測した後、DBHを用いて立木中心位置を算出した。樹高の測定にあたっては、樹高測定器（OPTI-LOGIC社製LASER RANGE-FINDER 400LH）を用いた。

調査地のha当たり本数・材積は374本/ha・278m³/haであった。林床は定期的な草刈りにより強度に刈り払われているため、立木の根元までの見通しは良い。

5.2.3 スキャナ計測値の精度

5.2.3.1 検証方法

スキャナ計測は、機種による差異、スキャン解像度による差異を検証するためにCyrax2500（以下Cyraxと略す）とRIEGL LMS-Z210（以下RIEGLと略す）を調査地のFig. 5.2.3上の点Cおよび点P1に設置し計測を行った。RIEGLについては計測時の角度分解能による差異を検証するため、0.2gon（=0.18°）・0.08gon（=0.072°）の2つのモードにて計測を行った。また、1点からの計測では立木の陰になり、背後の立木が測定されないことが予測される。このため、複数点からの計測によって計測可能木・精度にどのように変化するか検討するため、RIEGLについて4点（P1・P2・P3・P4）に設置して0.2gonモードで計測を行った。また、z座標はP1の

観測高を1.2m（胸高）として各点の測定を行った。データの解析には Cyclone および ArcView、ArcGIS を用いた。具体的な手順を次に示す。

- 1) スキャナ計測を行う。
- 2) 取得した点群のデータから、地上高0.2m ~ 2.2m の範囲のデータを抽出する。
- 3) Cyclone 上で抽出した点群データを判読し、一つの樹幹と判断された点群を選択してこれを円柱モデルで近似する。この作業を対象プロット内全域で行う。
- 4) 近似した円柱の直径を胸高直径とする。また、円柱の中心線と $z = 1.2\text{m}$ 平面との交点座標を立木位置とする。
- 5) 毎木調査による立木データに対して、スキャナ計測による立木データのうち最も近い立木を対応する立木とする。
- 6) 上記 5) の結果、以下のものは除外する。
 - ・ 対応するデータセット間の距離が 1 m 以上のものは異なる立木と判断し、除外する。
 - ・ 計測結果の DBH が 1 m 以上の場合は、異常値として除外する。
- 7) 残ったスキャナ計測立木の x 、 y 、DBH に対して、対応する毎木調査による計測立木の x 、 y 、DBH を真値とみなし、双方間の誤差を求める。

計測の精度の評価には誤差の標準偏差を、確度の評価には誤差の平均を用いた。

5.2.3.2 結果

計測したデータの例の鳥瞰図を Plate 5 に示す。この例では、P 1 および P 2 からの観測結果をそれぞれ赤と青の点群で三次元表示している。立木の胸高部分のみならず樹幹上部、枝、樹冠の一部まで座標が取得されていることがわかる。ただし、立木の陰になり計測できない部分もある。黄色で示した円柱は0.2~2.2m 部分の点群を円柱モデルで近似した結果である。

機種および分解能の違いによる計測結果を Table 5.2.2 に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を Fig. 5.2.4 に示す。胸高直径の測定誤差は観測点から計測対象立木までの距離（以下対象範囲とする）にかかわらず、Cyrax の確度が 1 cm 以内、精度が 3.3cm 以内となっている。これに対し、RIEGL は対象範囲 20m 未満で確度 1 cm 以内、精度も 4.3cm 以内となっているものの 20m 以上の範囲で確度・精度とも低下している。また、RIEGL の 0.2gon と 0.08gon を比較すると、0.08gon の方は計測可能木が多かったが精度は悪くなっていた。解像度 0.2gon では立木と判断できなかったものの中にも、0.08gon では立木と判断できるものが存在した。しかし、これらの立木は小径木や他の立木の背後にあり一部しか計測されていないものが多いため、精度の悪化につながったと考えられる。計測本数率ではいずれも対象範囲 20m 未満の場合約 70% 観測できていたが、対象範囲 20m 以上では半数

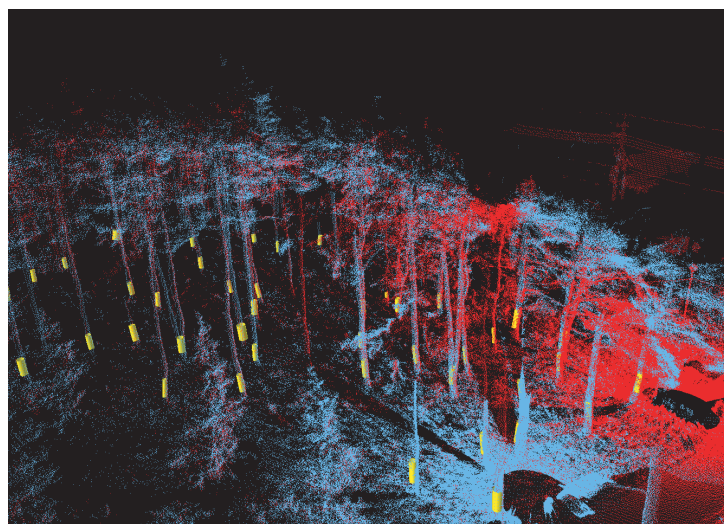


Plate 5. Bird-view of point crowds derived from laser scanner (RIEGL) . Red: Point Crowds from P1 Blue: Point Crowds from P2. Yellow: Cylinder Model Fitted to the Point Crowds.

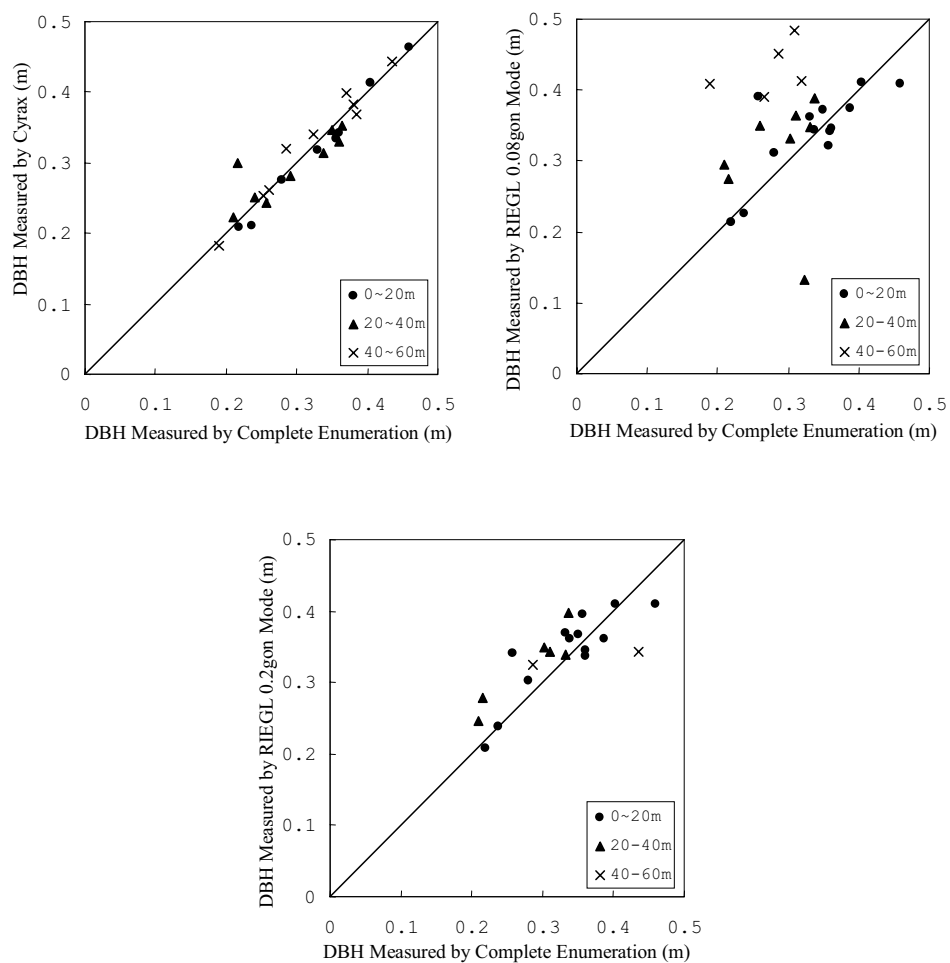


Fig. 5.2.4. Comparisons of DBH measured by complete enumeration and laser scanners.

Table 5.2.2. Results of measurement according to scanner models.

Measurement System and Scanning	Scanning Distance	Counted Number of Trees	Count Ratio	Measurement Error of	Measurement Error of DBH(cm)	
					Accuracy	Precision
Cylax	~ 20m	8	72.7%	1.7	-1.0	0.1
	20m ~ 40m	9	45.0%	3.3	-0.1	3.3
	40m ~ 60m	10	22.2%	2.8	0.5	2.1
RIEGL 0.08gon	~ 20m	13	72.2%	4.2	0.6	4.3
	20m ~ 40m	8	27.6%	2.6	2.4	8.4
	40m ~ 60m	5	11.1%	7.7	15.5	4.3
RIEGL 0.2gon	~ 20m	13	72.2%	4.3	0.7	3.3
	20m ~ 40m	7	24.1%	2.3	4.0	1.9
	40m ~ 60m	2	4.3%	5.1	-2.7	6.5

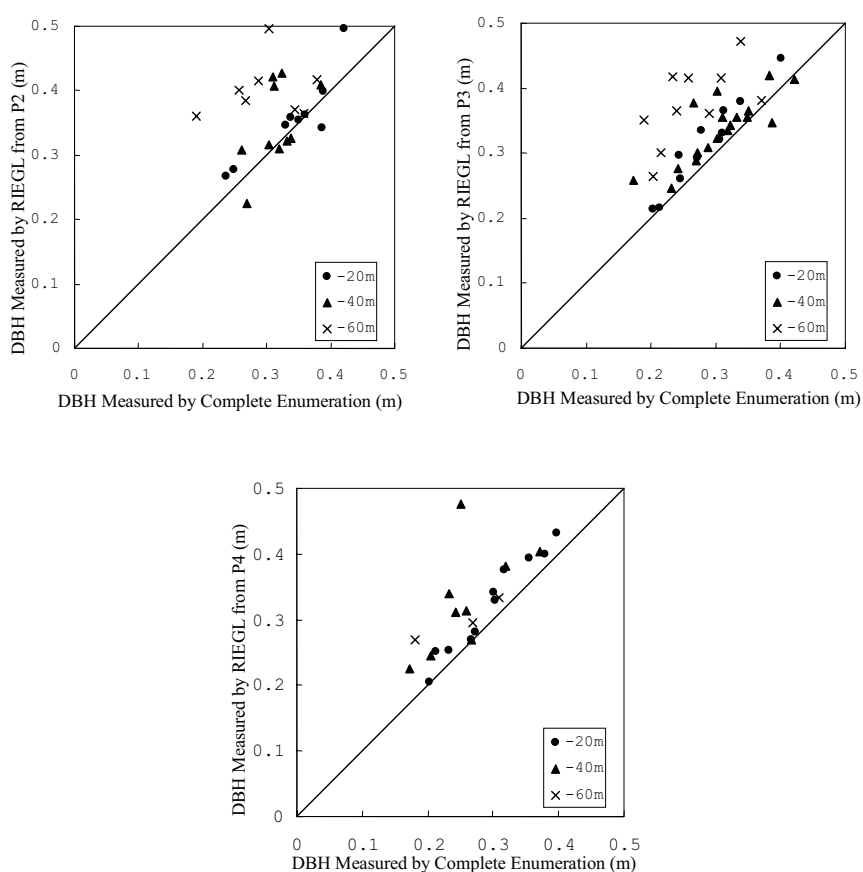


Fig. 5.2.5. Comparisons of DBH measured by complete enumeration and RIEGL 0.2gon Mode.

Table 5.2.3. Results of the measurement according to scanning points.

Scanning Point	Scanning Distance	Counted Number of Trees	Count Ratio	Measurement Error of Location (cm)	Measurement Error of DBH(cm)	
					Accuracy	Precision
P1	~ 20m	13	72.2%	4.3	0.7	3.3
	20m ~ 40m	7	24.1%	2.3	4.0	1.9
	40m ~ 60m	2	4.3%	5.1	-2.7	6.5
P2	~ 20m	10	47.6%	5.8	1.3	2.9
	20m ~ 40m	13	29.5%	2.5	4.8	5.8
	40m ~ 60m	4	12.1%	1.8	13.2	6.0
P3	~ 20m	14	56.0%	2.4	3.4	2.3
	20m ~ 40m	25	39.1%	4	4.0	5.1
	40m ~ 60m	0	0.0%	-	-	-
P4	~ 20m	15	55.6%	2.8	3.7	2.6
	20m ~ 40m	6	19.4%	3.9	8.7	7.1
	40m ~ 60m	2	4.8%	8.1	5.6	3.1

以上が観測できていなかった。位置精度は2 cm ～ 8 cm 程度であり、特にCyrax では4 cm 以内に収まっていた。

次に、測定地点の違いによる計測結果を Table 5.2.3に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を Fig. 5.2.5に示す。胸高直径は対象範囲20m 以内では精度が3.3cm 以内であるが、対象範囲が広がるとP 1を除き確度・精度ともに低下している傾向が見られる。計測本数率は、対象範囲20m まででP 1が約70%であり、他は約50%となっている。これはP 1が林地と開放地の境界部であり視通が良いため、計測本数率が上がったと思われる。

次に、複数の観測点の点群データを用いて解析した計測結果を Table 5.2.4に、胸高直径の各計測値と実測値の比較を Fig. 5.2.6に示す。複数計測点からの観測により計測本数率が向上しており、4 箇所からの計測では68.4%が計測可能であった。胸高直径の確度は3.6cm、精度は4.3cm となった。また、計測対象範囲をそれぞれの計測点から20m 未満とすることにより、計測本数率は84.8%になり胸高直径の確度・精度も向上した。

以上のことから胸高直径はCyrax の場合、対象範囲が60m 程度でもある程度の精度を持つが、RIEGL の0.08gon、0.2gon の場合のいずれも対象範囲を20m 程度とすることが望ましいと判断された。また、複数の観測点からの計測の場合も対象範囲を各計測点から20m 程度とすることで、計測本数率・胸高直径測定精度の向上を図ることができた。しかし、この場合でも計測本数率は約80%であり、また、確度がプラス方向にずれる傾向がある。

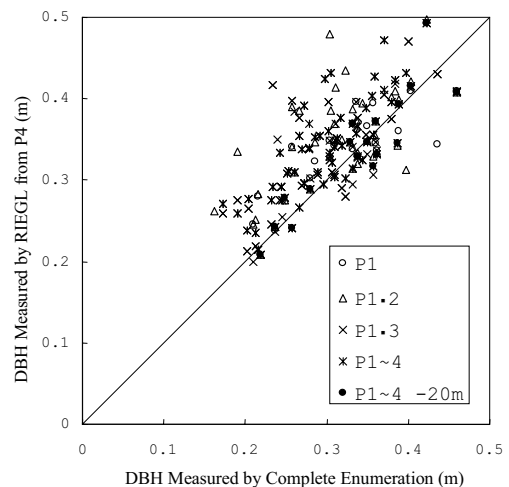


Fig. 5.2.6. Comparisons of DBH measured by complete enumeration and RIEGL data of some scanning points.

5.2.4 材積・炭素重量の精度

5.2.4.1 材積・炭素重量の算出方法

材積は樹高曲線を作成 (Fig. 5.2.7) し、下記の材積式 (林野庁計画課 1970b) を用いて求めた。

$$\log V = 1.863288 \log D + 1.004738 \log H - 4.249808 \quad (4 \leq D < 32)$$

$$\log V = 1.895653 \log D + 0.811988 \log H - 4.060353 \quad (32 \leq D < 42)$$

$$\log V = 2.002385 \log D + 0.888616 \log H - 4.347438 \quad (42 \leq D) \quad (5.2.1)$$

ここで、 V ：材積、 D ：胸高直径(cm)、 H ：樹高(m)である。

炭素重量の算出にあたっては松本・鹿又 (2002) の推定方法より、式 (5.2.1)を用いて求めた。容積密度 (ρ_o) としてアカマツの0.405t/m³、拡大係数とし

Table 5.2.4. Results of the measurement using the data of some scanning points.

Scanning Point	Measurement Area	Counted Number	Count Ratio	Measurement Error of Location (cm)	Measurement Error of DBH(cm)	
					Accuracy	Precision
P1	60m × 45m	22	21.8%	4.1	1.9	4.6
P1-P2	60m × 45m	42	41.6%	4.9	3.6	5.4
P1-P3	60m × 45m	51	50.5%	3.5	2.8	4.9
P1-P4	60m × 45m	46	45.5%	5.2	2.9	5.0
P1~P4	60m × 45m	69	68.4%	3.8	3.6	4.3
P1~P4	60m × 20m	44	84.8%	4.2	2.3	3.5

Table 5.2.5. Number of trees, stand volumes and carbon weights.

Measurement Method	Measurement Area	Number of Trees (ha ⁻¹)	Stand Volume (m ³ ha ⁻¹)	Carbon Weight (tC/km ²)
Complete Enumeration	60m×45m	374	276.9	9532.3
	60m×20m	433	333.9	11494.8
RIEGL P1~P4 (0.2 gon)	60m×45m	256	208.7	7185.7
	60m×20m	367	340.2	11710.9

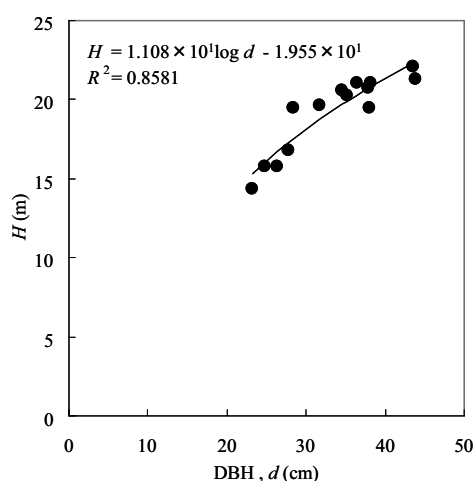


Fig.5.2.7. Height curve in the investigated stand.

て針葉樹の1.7を用いた。

5.2.4.2 結果

ha 当たり本数・材積・炭素重量は Table 5.2.5 の様になった。プロット全体でのスカナによる計測結果は、材積・炭素重量が75%と過小に計測されていた。プロットの中で計測点に近い20m 部分のみに限った場合の計測結果は101.9%となった。

5.2.5 考察

DBH の計測精度については、Cyrax が高い精度で計測可能であった。RIEGL の場合は、解像度にかかわらずスカナ本体から20m 範囲内では高い精度で計測可能だが、20m 以上の範囲では精度が下がる傾向があった。また確度もずれる傾向があった。RIEGL の場合、解像度が0.08gon の場合でも50m 地

点でのレーザのピッチ間隔は6.3 cm に、0.2gon の場合は15.7cm になる。このような機器の制約の中、今回得られた測定誤差は15.7cm 以下に納まっており、複数観測点からの点群データの合成および円柱による近似の方法は精度向上に効果があったと考えられる。

確度のずれの原因としては、機器の系統的誤差、円柱モデルに近似する時の誤差が考えられるが、林ら (2001) のエッジ法ではこのような確度のずれは報告されていない。よって、機器の誤差ではなく、円柱モデル化時の誤差である可能性がある。Cyclone におけるモデル化は、点群データにモデルを近似させることで行う。たとえば、観測点からの距離が50m で DBH 30cm の立木を0.08gon 解像度で測定した場合、立木上水平方向に照射されるレーザの点数は4～5点である。点群の数が少ないと、個々の計測点の誤差がモデルの近似結果に大きな影響をおよぼすと考えられる。また計測対象物が立木という表面に凹凸があり形状も一定していない物体であることから、モデル化時に誤差が発生した可能性もある。このことから、今後林分調査に適応した点群モデル化手法を検討する必要があると考えられる。

立木位置座標については誤差は数 cm であったが、通常の巻き尺を使った立木位置測定ではこれ以上の誤差が生じると思われるので、本手法は有効な手段であると考えられる。

材積・炭素重量の推定については、プロットの中で計測点に近い20m 部分のみに限った場合、精度が向上していた。しかしこれは、本数の過小評価傾向と胸高直径の過大評価傾向で相殺された結果であると考えられ、必ずしも精度良く計測されたとは考えられず、今後の検討が必要であろう。

5.3 地上レーザスキャナを用いた林分材積の計測

5.3.1 箕輪法の原理

本項では、地上レーザスキャナのデータ解析に箕輪法を導入する方法を検討する。箕輪法はビッターリッヒ法を基に展開された理論である。ビッターリッヒ法とは胸高断面積合計を測定する手法であり、その測定方法は次の通りである。ある十分に広い林地において無作為に点を落とし、その点に立って周囲の立木の胸高直径を視角 α のスリットで観測する。そして胸高直径が、その視角 α より大きな立木の数を知る。いま、この値に関して1点当たりの期待値を B とする。この林分（面積 T ）の胸高断面積合計 G は、

$$G = BT \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (5.3.1)$$

によって求められる（南雲・箕輪 1990）。

さらに、これを三次元空間に拡張し林分材積を求めようとした理論の1つが箕輪法である。やはり十分に広い林地において無作為に点を落とし、その点に立って一定の仰角 β で全周囲を見通し、観測できた立木の切断径 $d(h)$ と切断高 h を測定する (Fig. 5.3.1) ことで直接林分材積を推定する方法であり、全林材積は次式で求められる。

$$V = \sum v = \frac{T}{8 \cot^2 \beta} \cdot \sum E \left(\frac{d^2(h)}{h} \right) \quad (5.3.2)$$

ここで、 V ：全林材積 v ：当該林木の幹材積、 T ：全林面積 N ：立木本数、 h ：切断高 $d(h)$ ：切断径である。 $T = 1\text{ha}$ とすることで、 ha 当たり材積が求められる。

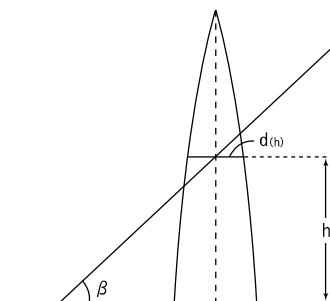


Fig. 5.3.1. The parameters of Minowa's method.

5.3.2 検証対象林分

地上レーザスキャナの計測は、まず解析手法の検討を行うため、比較的単純な林分である平地の人工林2カ所 (Plot E・C) において行った。次に、傾斜地における解析手法の検討を行うため、傾斜地の人工林1カ所 (Plot N) において行った。さらに、より複雑な林分での計測可能性を検討するため、傾斜地の天然林2カ所 (Plot Up、Np) にて行った。

Plot E は茨城県つくば市にある国立環境研究所敷地内のアカマツ林に設定した。林内に $60\text{m} \times 45\text{m}$ のプロットを設定し、胸高直径 8cm 以上の個体について毎木調査を行った。調査地の ha 当たり本数・材積は $440\text{本/ha} \cdot 278\text{m}^3/\text{ha}$ であった。林床は定期的な草刈りにより強度に刈り払われており、地形はほぼ水平であった。Plot C は、苫小牧市内にある苫小牧国有林1198林班のカラマツ造林地（1958年植栽）を対象とした。林内には、他にエゾマツ、広葉樹が侵入している。林床はオシダ、シラネワラビなどのシダ植物に、低木のフッキソウが混生する植物によって占められ、一部クマイザサが優占している。林内に $100\text{m} \times 100\text{m}$ のプロットを設定し、調査区内の胸高直径 5cm 以上の個体に対し毎木調査を行った。毎木調査は、胸高直径について巻尺を用いて mm 単位で計測し、樹高階毎の代表木に対して樹高を測定、樹高曲線を作成することで個々の樹高を求めた。Plot N は、北海道中川郡中川町の北海道大学中川研究林17林班に設定した長期観察林クネネシリ造林地 No. 3 区画 1～区画 2 を対象とした。プロットは約 15° の斜面上に位置するカラマツ造林地で、サイズは $50\text{m} \times 100\text{m}$ である。胸高直径 10cm 以上の個体に対して毎木調査を行った。毎木調査の項目は胸高直径・樹高・樹種とした。

Plot Up は北海道雨竜郡幌加内町の北海道大学雨龍研究林416林班に設定された長期観察林 NO18 を対象とし、 $100\text{m} \times 50\text{m}$ のプロットを設定した。Plot Np は北海道中川郡中川町の北海道大学中川研究林99林班に設定された長期観察林99林班第2区画を対象とし、 $50\text{m} \times 25\text{m}$ のプロットを設定した。調査地は共に汎針広混交林帯に属する天然林で約 10° の斜面上に位置する。胸高直径 10cm 以上の個体に対して毎木調査を行った。毎木調査の項目は胸高直径であった。

立木幹材積は、Plot N については北海道大学研究林で調整された1変数材積表を用いて算出し、その他のプロットについては胸高直径・樹高より次に示す幹材積表を用いて求めた。カラマツについては北海道

Table 5.3.1. Description of investigated plots.

Plot Name	Plot E	Plot C	Plot N	Plot Up	Plot Np
Plot Area (ha)	0.27	1.00	0.50	0.50	0.13
No. of Trees (ha ⁻¹)	441	1087	616	412	736
Stem Volume (m ³ ha ⁻¹)	276.9	158.9	261.9	363.1	260.0

立木幹材積表（中島 1948）を用い、アカマツ・エゾマツ・広葉樹については立木幹材積表（林野庁計画課 1970b）を用いた。各プロットの ha 当たり本数・材積は、Table 5.3.1のとおりであった。

5.3.3 計測および解析方法

測定には、地上レーザスキャナである RIEGL 社製 LMS-Z210を用いた。スキャナ計測を行った計測点数および計測高を Table 5.3.2に示す。林床植生が少なく見通しの良い Plot E、C、Np の計測においてはスキャナを胸高位置（本州1.2m、北海道1.3m）に設置し、林床植生が多く見通しの悪い Plot N、Up の計測においては高い位置（地上1.8m）に設置した。RIEGL の設置方向は、平地である Plot E、C では水平面に対して垂直方向とした。また傾斜地では、水平面に対して垂直方向とする方法（Plot Up、Np）と地面傾斜面に対し垂直方向とする方法（Plot N）の二通りの方法を試みた。

各計測点では、視野角：水平330°×垂直 ±40°、角度分解能：水平0.072°・垂直0.144°の範囲を計測した。一点あたりの計測にかかる時間は約8分程度で、三脚設置・計測準備・撤収も含め約15分程度である。

解析の手順を Fig. 5.3.2に示す。処理の概略は以下のとおり。

1) 各計測点においてレーザスキャナにより取得され

た計測情報は、距離・水平角・垂直角・反射強度・時刻で構成される距離画像情報として格納される。（Fig. 5.3.2(1)(2)）

2) 距離画像を解析し、計測高・樹幹上部直径・距離情報を抽出する。（Fig. 5.3.2(3)）

3) 距離画像を、三次元点群データに変換、フィルタリング処理を行い、DTM を作成する。（Fig. 5.3.2(4)）

4) 斜面補正を行い、仮想的な水平空間を作成する。（Fig. 5.3.2(5)）

5) 箕輪法を適用して材積を求める。（Fig. 5.3.2(6)(7)）

Plate 6(1)に計測された距離画像の例を示す。この画像から、領域成長法により近傍の距離の差がある閾値（4 cm）以下の点の集合領域を抽出した（Plate 6(2)）。この抽出された集合領域には、樹幹の他に葉群も含まれている。そこで「樹幹は垂直方向に長いという」特徴を用い、集合領域を長方形近似した後この長方形の傾斜角を計測し、その傾きが鉛直方向からある閾値（±25°）以内の領域を選択することで樹幹領域を抽出した（Plate 6(3)）。この抽出した樹幹領域の情報と距離・水平角・垂直角情報を用いて、樹幹の任意の部位の相対計測高・樹幹上部直径・計測点までの距離を算出した。次に、箕輪法は対象地が平地であることを想定しているため、計測対象地が傾斜地の場

Table 5.3.2. Observed points.

Plot Name	Plot E	Plot C	Plot N	Plot Up	Plot Np
No. of Observed Points	5	8	6	4	4
Height of Observed Point (m)	1.2	1.3	1.8	1.8	1.3

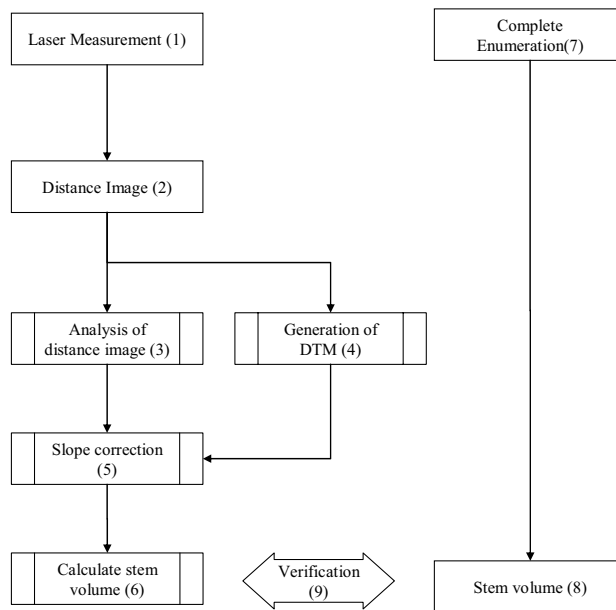


Fig.5.3.2. The flow chart of data analysis.

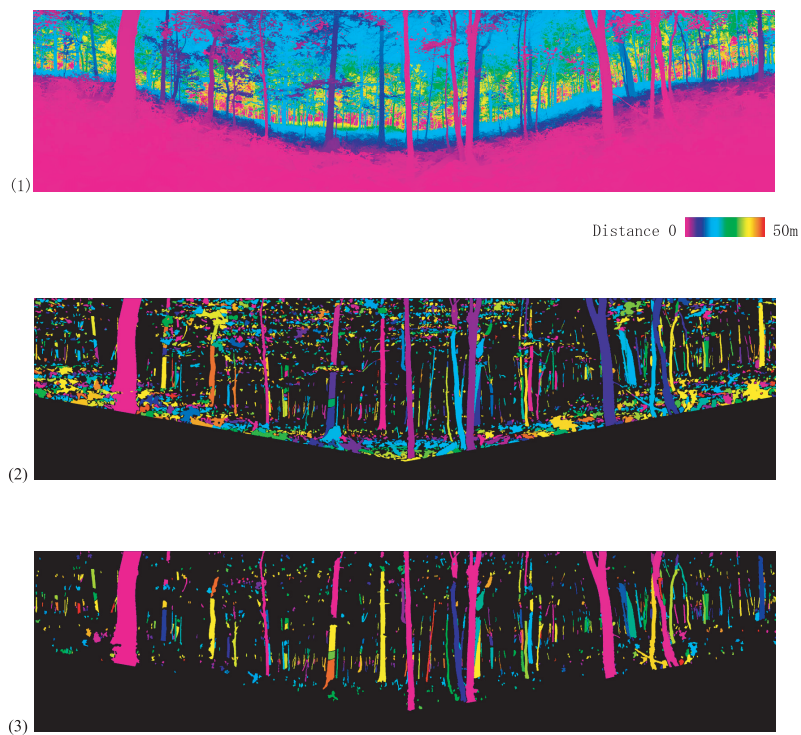


Plate 6. Analysis of distance image. (1) Upper: Distance Image obtained by the scanner. Colors show the distance. (2) Middle: Extracted image by using region growing method. One color shows one region. (3) Lower: Extracted stem images. One color shows one part of stems.

合は傾斜の補正を行い仮想平面空間を作成する必要がある。そのため、まず地盤高平面 (DTM) を作成した。距離画像を計測点を原点とする x 、 y 、 z の三次元点群データに変換し、航空機レーザ測量データから地面高データを抽出するために用いられるフィルタリングを行うことで、地面を抽出して地上レーザスキャナとの比高による DTM データを作成した (Plate 7)。斜面補正の模式図を Fig. 5.3.3 に示す。箕輪法に必要な計測高 h と仰角 β は次の式で求めた。

$$H_{LS}(x, y, z) = R_{LS}(x, y, z) \sin(\theta_{LS}(x, y, z)) \quad (5.3.3)$$

$$D_{LS}(x, y, z) = R_{LS}(x, y, z) \cos(\theta_{LS}(x, y, z)) \quad (5.3.4)$$

$$h = H_{LS}(x, y, z) + (-H_{DTM}(x, y, z)) + H'_{FV} \quad (5.3.5)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{D_{LS}(x, y, z)}\right) \quad (5.3.6)$$

ここで、 (x, y, z) は計測対象の観測点 O からの相対座標、 $R_{LS}(x, y, z) \cdot \theta_{LS}(x, y, z)$ は地上レーザスキャナで計測した距離情報・仰角、 H'_{FV} は林床植生高である。林床植生高は計測対象林分で一定であると仮定して、レーザスキャナ計測地点付近の林床植生高 H_{FV} で代用した。

次に、箕輪法により材積を算出し、レーザスキャナ計測地点の材積値を平均することで林分の材積を求めた。なお、 β にはできるだけ大きな仰角を確保するため、RIEGL の最大仰角である 40° 付近の情報を使用することとした。また、自動計測した樹幹上部直径値にはノイズが含まれるため仰角 $35^\circ \sim 40^\circ$ の計測値のメディアンを使用し、仰角は 37.5° とし、その仰角で示す高さを計測高とした。

最後に、使用した地上レーザスキャナは 330° の水平角のみ計測可能であり、 360° の情報を一度に取得することができない。そのため、林縁補正の方法である

GROSENBAUCH 法 (南雲・箕輪 1990) の考え方をを用い、下記の式で補正した。

$$V_C = \frac{360^\circ}{330^\circ} V \quad (5.3.7)$$

ここで、 V_c : ある点での材積、 V : ある点でレーザスキャナにより算出した材積である。また、地上レーザスキャナを水平面に対して垂直に設置した Plot UP、Np の場合は、Fig. 5.3.4 に示すように斜面上部方向に対して大きな仰角を確保することができない。このため、計算には斜面下部方向の 180° の画像のみ使用し、同様に GROSENBAUCH 法を用い下記の式で補正した。

$$V_C = \frac{360^\circ}{180^\circ} V \quad (5.3.8)$$

ここで、 V_c : ある点での材積、 V : ある点で斜面下部方向のみから算出した材積である。

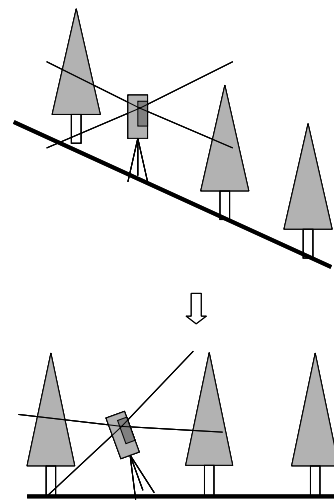


Fig.5.3.4. FOV (Field of View) of laser scanner.

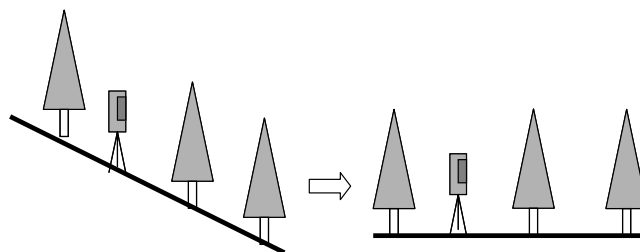


Fig. 5.3.3. Diagrams of slope correction.

Table 5.3.3. Result of laser scanner measurement.

Plot Name	Plot E	Plot C	Plot N	Plot Up	Plot Np
Measured Stand Volume by Complete Enumeration (m^3)	276.9	158.9	261.9	363.1	260.0
Estimated Stand Volume by Using Laser Scanner (m^3)	271.1	150.5	253.9	400.1	288.6
Error Ratio (%)	-2.2	-5.6	-3.2	9.2	9.9

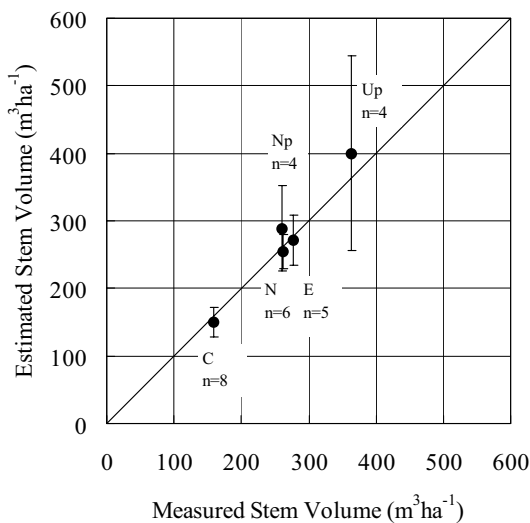


Fig.5.3.5. Result of laser scanner measurement. Black dot shows average and error bar shows S.D.

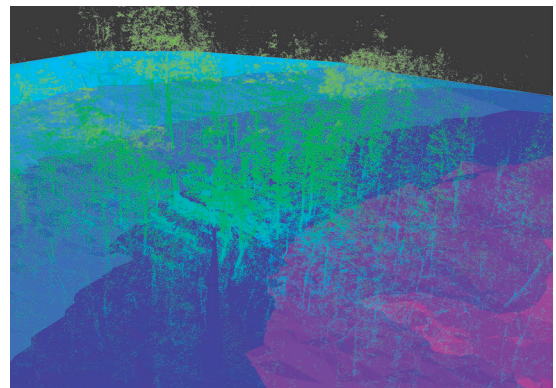


Plate 7. Bird-view of a data derived from laser scanner (RIEGL) Green dots shows point crowd of data. The gradation from blue to purple shows ground data. The ground data are the DTM.

Table 5.3.4. Carbon Weight using Laser Scanner Measurement.

Plot Name	Plot E	Plot C	Plot N	Plot Up	Plot Np
Estimated Carbon Weight of the Stand (tC/km^2)	9331.0	5681.5	9582.1	15752.3	11365.3

炭素重量の算出にあたっては、式 (5.2.1)、式 (5.2.2) を用いて求めた。容積密度 (ρ_o) ・拡大係数としてそれぞれ、Plot E ではアカマツの $0.405 \text{ t}/\text{m}^3$ ・針葉樹の 1.7 を、Plot C、Plot N ではカマツの $0.444 \text{ t}/\text{m}^3$ ・針葉樹の 1.7 を、Plot Up、Plot Np では、全樹種平均の $0.45 \text{ t}/\text{m}^3$ ・針葉樹と広葉樹の平均の 1.75 を使用した。

5.3.4 結果と考察

推定材積および毎木調査による材積を、Table 5.3.3 および Fig. 5.3.5 に示す。平均値の RMSE は、 21.7 m^3 であった。また Table 5.3.4 に炭素重量を示す。

これらによると、Plot E、C、N（以下 Ax）は推定誤差率 $2 \sim 6\%$ 程度であったが、Plot Up、Np（以下 Bx）では、 $9 \sim 10\%$ 程度と比較的大きくなった。また、計測点間のばらつきを示す標準偏差も

Plot Ax では小さいが、Plot Bx では大きくなる傾向があった。Plot Ax ではばらつきや誤差率も小さく、高い精度で計測できた。特に Plot N では、傾斜地であるにもかかわらず他の平地林分と同様に計測が可能であったことから、斜面補正の方法が有効であると考えられた。Plot Bx ではばらつき、誤差率も大きくなる傾向がみられたが、これらの原因として Plot Bx は計測点が少ないことや斜面下方向のデータしか使用しなかった事など計測に起因する原因が考えられる。箕輪法を始めピットーリッヒ法では、確率論的に林分のパラメータを推定するため、精度良く計測するため

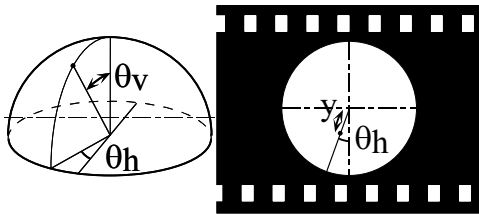


Fig. 5.4.1. Fisheye lens specification.
(From NIKON instruction manual)

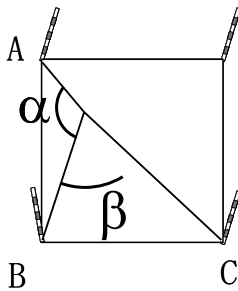


Fig. 5.4.2. Calculation of measurement position.

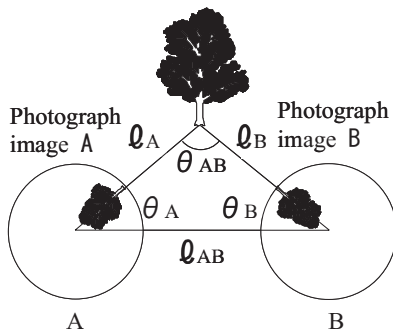


Fig. 5.4.3. Calculation of tree location.

にはできるだけ試料を多く用意する必要がある。逆に、計測点を少なくする、計測する角度を少なくする等、試料を少なくするとそれだけ、計測結果のばらつきが大きくなる。また、Plot Up は、元来天然林のギャップ更新の動態を調査するために設定されたプロットのため林内では不均一性が増大しており、このことばらつきが大きくなった原因と考えられる。本調査では各プロットに対して4点の計測を行ったが、天然林においてはより多くの観測点が必要と考えられる。

大隅 (1987) がスギ人工林の林分材積を推定するため、その対象地で調整した材積表と一般的に使用されている立木幹材積表 (林野庁計画課 1970b) を用いた値を比較したところ、約 6 % のくい違いを示している。また、計測過失 (測り落とし・二重測り・読み違い・聞き違い・書き違い) による誤差も一般に 2 % 前後あり、測定環境として恵まれた人工林でも 6 ~ 7 % に達することもある (菅原 1963) とされている。本手法による結果はこれらの結果と比べても遜色のないものであり、本手法が有効な手段であると判断された。

5.4 魚眼写真を用いた単木解析

5.4.1 原理

測定には Nikon Fisheye-Nikkor 8 mm f/ 2.8 を使用した。このレンズは Fig. 5.4.1 のとおり 180° の半球視野内にあるすべての被写体をフィルム平面上に円形画像として再現する特性がある。

天頂角 θ_v とフィルム画像の中心から像点までの距離 y との間には $y = c \theta_v$ の関係がある (c は定数)。また水平角 θ_h はフィルム画像上に θ_h として再現される。以上の特性を利用すれば、撮影点における目的物までの水平角と仰角を写真画像から求めることができる。撮影位置は Fig. 5.4.2 のとおり、既知点 A、B、C (今回の調査ではプロットの4隅) と A→B 間、B→C 間の角度 α 、 β を写真像から求め、算出することで測定する。

立木位置の測定は Fig. 5.4.3 のとおり、三角測量の要領で行う。その間の距離 l_{AB} が既知である点 A、点 B において写真撮影し、 θ_A 、 θ_B を求め、目的物の位置を算出する。

樹高の算出は Fig. 5.4.4 のとおり行う。目的物の位置が確定すれば距離 l が確定するため、見かけ上の樹高 h' は $h' = l \tan \theta$ で求める。実際の樹高 h は、撮影高 t を加算し、 $h = l \tan \theta + t$ で求める。

胸高直径の算出は Fig. 5.4.5のとおり行う。目的物の位置が確定すれば、距離・が確定するため、半径 r は $r = \ell \sin (\theta / 2)$ で求める。胸高直径は、 $DBH = 2 r = 2 \ell \sin (\theta / 2)$ で求める。

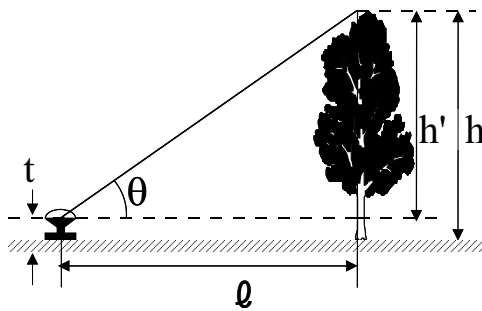


Fig. 5.4.4. Calculation of Tree Height.

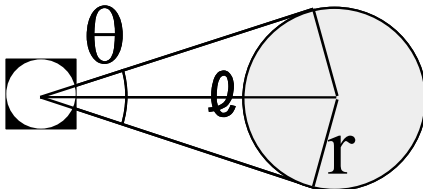


Fig. 5.4.5. Calculation of DBH.

5.4.2 検証対象地

検証は、北海道大学構内のハルニレ・キタコブシを主とした立木密度825本/haの広葉樹林において積雪上で行った。林内に20m×20mのプロット(Plot H)を設定し、胸高直径4 cm以上の個体について毎木調

査を行った。毎木調査は、測定法A・Bの2回にわけて行った。測定法Aは、測定時間計測のために通常の毎木調査を行った。測定法Bは、測定誤差算出のため特に正確さに気を配って毎木調査を行った。測定法Aにおいてはプロットを10mメッシュに区切って立木位置を、直径割巻尺により胸高直径を、測高ポール、ブルーメリス測高器により樹高を求めた。測定法Bにおいてはプロットを2.5mメッシュに区切って立木位置を求め、その他に関しては測定法Aと同じ方法で測定した。魚眼レンズ撮影（以降測定法Fとする）は、プロット縁部を除くプロット内部に5 m間隔、計9カ所でカメラを三脚に固定、レンズを鉛直方向に向けて行った。写真判読時に胸高位置の決定を容易にするために、プロット内部の対象木には紙テープを胸高位置に巻き付けた。また個体識別を容易にするために、その紙テープの色として立木番号の下1桁が1・6の個体にはピンク色を、2・7、3・8、4・9、5・0の個体にはそれぞれ紫色、水色、黄色、緑色を使用した。写真判読は、プリントしたものをイメージスキャナーでコンピュータに取り込み画像解析ソフト（NIH-Image 1.57）上で判読を行い、結果はマクロプログラムによりテキストファイルに書き出した。

次に平均誤差（率）と標準誤差（率）を以下のようにして求めた。

$$(\text{測定誤差}) = (\text{魚眼レンズ測定値}) - (\text{真値})$$

真値は、測定法Bによる測定値とした。この測定誤差の平均を平均誤差、標準偏差を標準誤差とした。さらに胸高直径と樹高に関しては、平均誤差・標準誤差を真値の平均で除して、平均誤差率・標準誤差率を求めた。

5.4.3 結果および考察

撮影地点の位置を求めるための既知点として、

Table 5.4.1. Measurement errors.

	Average Error ±95% CI	S.D. of Error	Ratio of Average Error	Ratio of S.D. of Error
Position (m) X	0.40±0.45	1.16		
Y	0.06±0.12	0.31		
DBH (cm)	-0.7 ±0.7	1.93	- 4%± 4%	11%
Height (m)	-4.6 ±1.5	3.88	-50%±16%	42%

Table 5.4.2. Errors with reduced measurement points.

Number of Measurement Points	Counted Trees			Average Error ±95% CI	S.D. of Error	Ratio of Average Error	Ratio of S.D. of Error
5	18	Position (m)	X	-0.20±0.65	1.41		
			Y	0.36±0.77	1.66		
		DBH (cm)		-1.2 ±2.5	5.32	- 7%±14%	31%
		Height (m)		-3.4 ±2.5	5.32	-36%±26%	57%
4	16	Position (m)	X	-0.80±1.27	2.60		
			Y	0.39±0.68	1.39		
		DBH (cm)		-1.9 ±2.8	5.61	-11%±16%	32%
		Height (m)		-3.4 ±2.8	5.61	-37%±30%	60%
2	5	Position (m)	X	-0.20±0.22	0.25		
			Y	-0.10±0.25	0.29		
		DBH (cm)		-1.5 ±2.5	2.89	- 9%±15%	17%
		Height (m)		-6.3 ±4.1	4.68	-67%±44%	50%

Table 5.4.3. Measurement time.

Measurement Method	Process	Number of People	Working Minutes	Total Man-Minutes
Fisheye Method	Make Plot	3	20	60
	(Method F) Taking Picture	1	20	20
	Reading Picture	1	240	240
	Total			320
Complete Enumeration	Make Plot	3	20	60
	(Method A) Complete Enumeration	3	100	300
	Total			360

プロット4隅に立てた測量用ポールを使用した。9撮影地点の内1カ所で、写真上において測量用ポールが3個判読できない場所があった。残りの8撮影地点についての位置の平均誤差は、X軸方向が-0.23~0.04m (95%信頼区間、以下同様) Y軸方向が-0.24~0.23mであった。撮影地点の特定できた8撮影地点による立木位置、胸高直径、樹高の測定結果をTable 5.4.1に示す。対象木30本のうち26本の測定が可能であった。平均誤差は位置のX軸方向が-0.05~0.85m、Y軸方向が-0.06~0.18m、胸高直径は-1.4~0.0cmであった。また胸高直径の平均誤差率は-4%、標準誤差率は11%であった。なお、測定できなかった立木や誤差率の大きかった立木は胸高直径6cm以下の個体が多かったが、これは胸高直径の小さな個体の判読が難しく、ステレオペアを見つけれなかったり、コンピュータディスプレイ上での解像度に係わる系統的な誤差が生じたためと思われる。位置のX軸方向とY

軸方向では、平均誤差に差がみられた。これは撮影地点と対象立木の位置関係に起因するものと考えられるが、今回の調査では原因を特定することはできなかった。また、胸高直径が大きな個体では、胸高直径の誤差率は小さくなる傾向がみられた。一方、樹高は胸高直径に関係なく全体に大きな誤差を生じ、平均誤差、標準誤差共に大きくなっていた。これは、対象林分が広葉樹林分であったこともあり、梢端の判読が困難であったためと思われる。次に、撮影地点を減じた場合の測定誤差をTable 5.4.2に示した。撮影地点数を減じるほど測定可能本数が減少し、平均誤差、標準誤差共に増大する傾向にあるが、撮影地点数2の場合は標準誤差が減少しているものの測定可能本数も減少していた。これは、測定困難な個体が測定不能になったため相対的に標準誤差が減少したものと考えられる。

次に測定に要する人員および時間であるが、測定法Fの写真撮影は1人で行うことができ、プロット設

定も2人で可能なので、作業人員は最小2人で調査が可能であった。野外での測定時間はTable 5.4.3に示すとおり20分程度で、通常の毎木調査の方法に比べて延べ時間で約280分短縮することができた。しかし、写真の判読時間が熟練後も1枚について約30分必要であった（8枚で約4時間）。すなわち、野外での測定時間は大幅に短縮できたが、解析作業に時間がかかり、合計の所要時間は測定法Aとほぼ同じになった。

以上のことから、本手法を用いることにより、位置、胸高直径を計測することが可能となった。作業時間についても、屋外での作業時間を短縮できることが明かになった。奥地の森林や海外森林等、対象林分で十分な調査時間が確保できない森林調査の現状把握に役立つと考えられる。

5.5 写真測量を用いた林分解析

5.5.1 検証林地および解析方法

検証は、先の茨城県つくば市にある国立環境研究所敷地内のアカマツ林（Plot E）において行った。調査林分の毎木調査による材積は $276.9 \text{ m}^3/\text{ha}^{-1}$ であった。

計測は以下の手順で行った。

- 1) 対象林内のいくつかの点において、位置を若干ずらして撮影を行う。
- 2) 撮影したステレオペア画像から写真測量を行うことで距離画像を取得する。
- 3) 距離画像から箕輪法を用いて林分材積を得る。

撮影には、デジタル一眼レフカメラであるNIKON D70（CCD：600万画素）に $f = 20\text{mm}$ の単焦点レンズを装着して使用した。写真測量解析のためには、あらかじめ使用するカメラの詳細なキャリブレーションデータが必要であるが、使用したカメラは民生用のため、このデータの入手が困難である。そこ

で、カメラキャリブレーションシート（Fig. 5.5.1）を8方向から撮影を行い、カメラキャリブレータ（Photo modeler Pro3.0）を用いてカメラのキャリブレーションを行った。

使用したカメラ・レンズのキャリブレーション結果はTable 5.5.1および式5.5.1のとおりであった。

$$\Delta D = 2.876 \times 10^{-4} r^2 + -4.550 \times 10^{-7} r^4 \quad (5.5.1)$$

ここで、 ΔD は歪み量（Lens Distortion：mm）、 r は主点からの距離（mm）である。

撮影は調査地内5カ所にて行った。撮影時には写真測量の基準点（GCP）を撮影対象付近に十字型のポールを設置した（Fig. 5.5.2）。2枚のステレオペア画像双方にこの基準点が写るように撮影を行った。撮影にあたり、2枚のステレオペア間の距離（基線長）は約20 cmとなるようにした。

写真測量解析にはLeica Photogrammetry Suite ATE 8.7を用い、キャリブレーションデータ、撮影写真を入力し、さらにGCP・Tie Pointも入力した。GCPは撮影された測量ポールの画像上に設置し、ポー

Table 5.5.1. Calibration Data of the Camera.

	x	y
CCD Size (mm)	23.476	15.600
CCD Pixel Size (μm)	7.8045	7.8000
Principal Point (mm)	-0.0205	0.0347
Focal Length (mm)	20.3063	

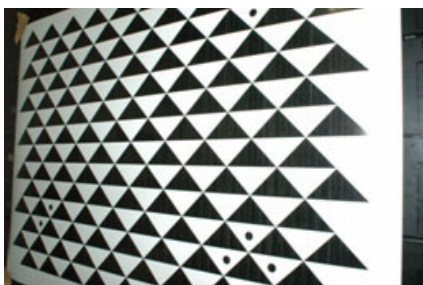


Fig. 5.5.1. Calibration Sheet.



Fig. 5.5.2. GCP Pole.

ルを基準としたローカル座標値を入力した。また Tie Point は、複数の写真上で同一と見なせる点に互いに設定した。GCP・Tie Point の情報から三角測量を行い、カメラの外部標定（カメラの位置・回転方向）を求め、複数の画像間でステレオマッチングを行い、画像上の点の x, y, z 座標を求めた。

次に箕輪法を適用するため、写真測量で求めた x, y, z 座標をカメラを原点とする極座標に変換し画像化を行い、マシンビジョン画像解析プログラム (HALCON) を用いて領域成長法により樹幹部を抽出、任意の位置の樹幹直径・測定高・仰角の自動計測を行った。なお、仰角 β にはできるだけ大きな仰角を確保するため、撮影画像の上端 40° 付近の情報を使用することとした。また自動計測した樹幹上部直径値にはノイズが含まれるため、仰角 $35^\circ \sim 40^\circ$ の計測値のメディアンを使用し、仰角は 37.5° とし、その仰角で示す高さを計測高とした。箕輪法を適用するにあたっては得られる画像の左右方向の画角が 70° であるため、次の式 5.5.2 で補正を行った。

$$V_c = \frac{360^\circ}{70^\circ} V \quad (5.5.2)$$

ここで、 V_c ：ある点での材積、 V ：ある点で斜面下部方向のみから算出した材積である。

炭素重量の算出にあたっては、松本 (2001) の推

定方法に従い式 (2.3.1)、式 (2.3.2) を用いて求めた。容積密度 (ρ_o) としてアカマツの 0.405 t/m^3 、拡大係数として針葉樹の 1.7 を用いた。

5.5.2 結果と考察

Plate 8 に、ステレオマッチングにより得られた点群データの鳥瞰図の一例を示す。また、Plate 9 に画像解析の一例を、Fig. 5.5.3 に例示した場所の現地写真を示す。ステレオマッチングにより抽出できた距離画像の解像度は約 0.2° であった。箕輪法による林分材積、炭素重量の計算値はそれぞれ $212.7 \pm 81.3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 、 $7322.2 \pm 1646.3 \text{ tC/km}^2$ (Avg. $\pm$ S.D.) で、誤差率は -23.2% となり過小評価傾向が見られた。通常、均一な壮齢林にてビッターリッヒ法を実行する場合、能率を考慮して ha あたり 5 点程度の標本点をとることになっている (南雲・箕輪 1990) が、この場合で材積の推定誤差率は約 25% とされている。本調査では ha あたり換算で 18.5 点で計測を行っているが、計測している水平角が 70° であり通常ビッターリッヒで用いられる 360° より遙かに少ないため、推定誤差率やばらつきが大きくなったと考えられる。しかしながら本調査では実材積は計測結果標準偏差内に収まっていることから、これらのばらつきを小さくすることができれば有用な林分計測方法となると考えられる。

ばらつきを小さくするためには、撮影時の水平角

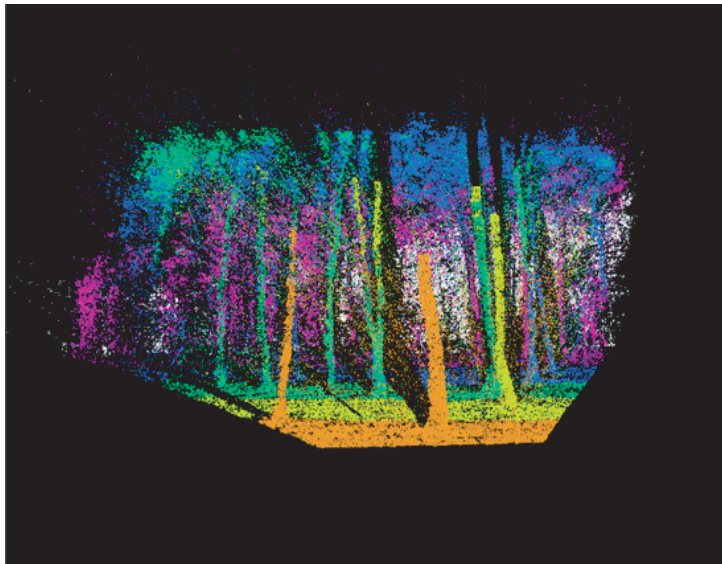


Plate 8. Bird-view of point crowd data derived from photographs taken with digital camera Color information shows the distance from the camera.



Plate Fig. 5.5.3. Photograph of the same place in Plate 9.

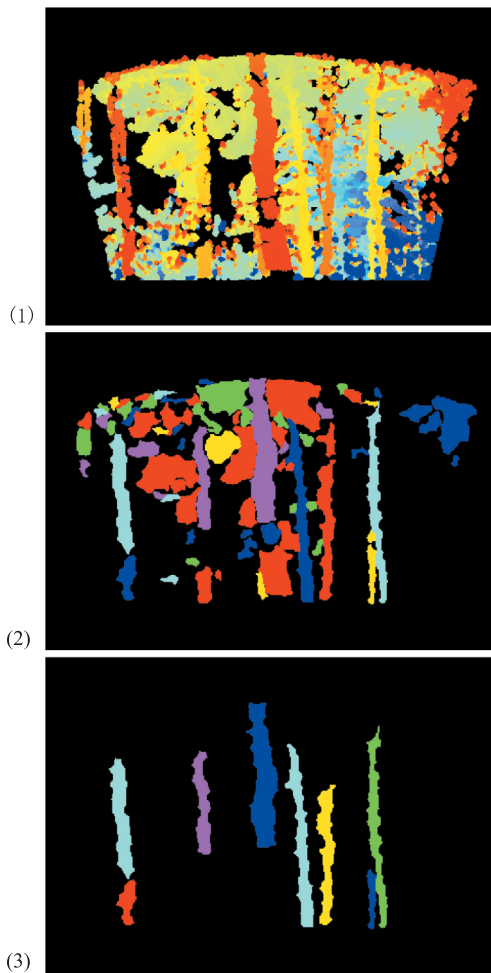


Plate 9. Analysis of distance image. (1) Upper: Distance image derived from photographs. Colors show the distance. (2) Middle: Extracted image using region growing method. One color shows one region. (3) Lower: Extracted stem images. One color shows one part of stems.

を大きくし計測点数を増やす必要がある。水平角を大きくするためには、同一点で角度を変えて撮影回数を増やす方法と、より広角のレンズを使用する方法がある。作業効率の点からは、計測点数や撮影回数を増やすよりも水平角を大きくすることが効果的と考えられる。しかし水平角を増やすためにはより広角のレンズを使う必要があり、写真測量の精度が低下することになる。Fig. 5.5.4に、対象物までの距離と奥行き誤差の関係を示す。本調査で用いた $f = 20\text{mm}$ 、 $\text{CCD} : 6\text{Mpixel}$ であれば、対象物までの距離 20m に対して 0.8m 程度の誤差が生じる。より広角のレンズ、たとえば対角で 90° が得られる $f = 14\text{mm}$ では 20m に対して 1.1m 程度の誤差となり、写真測量の精度が悪くなる。水平角が増えて算術法の精度が向上する可能性がある一方で、写真測量の精度が悪くなり計測結果に悪い影響を与える可能性がある。効率と精度はトレードオフの関係にあり、調査にあたっては適切な妥協点を見いだす必要がある。しかし一方では技術革新が著しく、たとえば CCD 画素数では民生用カメラでも 12Mpixel のものがすでに販売されている。この場合、 $f = 14\text{mm}$ のレンズを使用しても写真測量の誤差は 20m に対して 0.8m 程度の誤差となり、 $f = 20\text{mm}$ 、 6Mpixel の場合と同等となる。今後、このトレードオフの関係は CCD 技術の発展によって解決されるものと思われる。

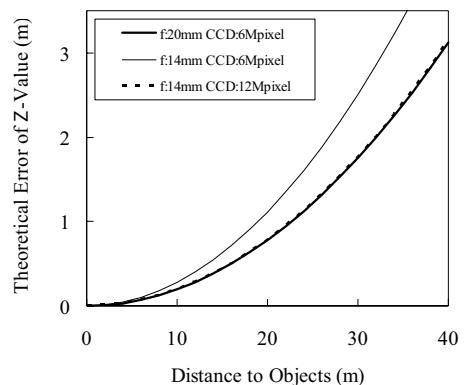


Fig. 5.5.4. Theoretical error of photogrammetry.

5.6 まとめ

衛星・航空機によるリモートセンシングのためのグラウンドトゥールズとしての林分調査を、簡便にかつ精度よく計測する方法の開発を目的として、地上レーザスキャナおよび写真を用いた計測手法の開発を行い、精度の検証を行った。

地上レーザスキャナを用いた単木解析では、立木座標を精度良く計測することが可能であった。立木毎の樹高や樹冠幅などを計測・評価するために、航空機や高解像度衛星によるリモートセンシングを用いることを想定した場合、トゥールズ調査には計測結果と立木個体との対応付けが必要と考えられ、このためには立木位置の正確さが必要である。この点、本手法は立木位置を精度良く計測できるため、有効な手段であると考えられた。また、DBHについてもスキャナから約20m以内の範囲であれば良い精度で計測することができるため、トゥールズとして小面積の林分を数多く調査する場合にも有効であると思われた。しかし、手前の個体の影となって計測できない個体の割合が多いため、そのまま材積・炭素重量を求めるには課題が残った。

地上レーザスキャナを用いた林分材積の計測では、材積推定に箕輪法の適用を試みた。その結果、地上レーザスキャナ計測に箕輪法を適用する方法が、人工林・天然林・平地・傾斜地問わず有効なことが明らかになった。天然林においては計測値のばらつきが大きくなるものの、観測点数を増やすことで精度向上を図れるものと考えられた。本手法の特徴としては、複数点からの観測データを結合するためのGCPの測量が必要なく、また円柱モデリングなどの複雑な処理が必要ないため、計測作業や解析作業の大幅な労力削減が可能となること、また、材積表や樹高曲線・形状比等をあらかじめ用意することなく直接材積を推定できることである。このため汎用性があり、林分材積計測手法として今後の発展が期待できる方法と考えられた。しかし、現在のところ価格が1000万～2000万円と高額で、重量も20kg程度と重いことから、一般に広く利用するには困難であると考えられた。

写真を用いた単木解析では、魚眼レンズを用いて二枚の写真撮影を行い目視にて対応点を求めることにより、立木位置・胸高直径の計測を行った。現地調査が簡単に行える一方、判読に熟練を要することから、内業作業にかかる負担の大きさが課題として残った。

写真を用いた林分解析では、二枚の写真撮影を行

い写真測量・ステレオ自動マッチングを行い、箕輪法を適用することで林分材積を求め精度検証を行った。過小評価傾向があったものの、観測点数を増やすことやより広角のレンズを用いることで、精度向上が図れるものと考えられた。

以上の「地上レーザスキャナを用いた単木解析」「地上レーザスキャナを用いた林分材積の計測」「写真を用いた単木解析」「写真を用いた林分解析」の4つの方法の特徴から、グラウンドトゥールズ計測の調査方法を選択するとすれば、地上レーザスキャナを用いた林分解析を用いて調査を行うのが理想である。しかし、多地点の調査を行うことは使用する機器が高価であることから困難である。そこで、地上レーザスキャナを用いた手法は、精密さを要求される調査地に使用し、その他の調査地ではより安価にできる写真を用いた林分解析の手法を用いると良いと考えられた。また、地上レーザスキャナを用いた地点では、単木単位の解析も行えるため、リモートセンシングを用いた解析結果を単木単位で検証することが可能となる。以上のことから、地上レーザスキャナを用いてリモートセンシング技術の検証を行い、写真を用いた林分解析の手法を用いてリモートセンシング技術の広域化に貢献する、という手順が妥当であると考えられた。

第6章 結言

以上記述してきた広域森林バイオマス計測手法として、単木法による航空機レーザ計測を用いた方法、森林体積法による航空機レーザ・航空写真を用いた方法、地上リモートセンシングによる方法の検証を行ってきた。本章では、研究の新規性について要約する。さらに今後の活用例として、森林動態調査への応用事例と全林レーザ計測が行われた天塩研究林の森林を事例に航空機レーザ計測を用いた森林バイオマス計測の計画案について述べる。

6.1 本研究の成果

本研究は、航空機および地上リモートセンシング計測を導入して、北方森林のバイオマスを広域に精度よく計測する手法、および森林の過去のバイオマスとバイオマス変化の過程を把握するための手法について研究を行ったものである。従来の森林リモートセンシング手法である航空写真の解析には、判読作業に熟練と時間を要するといった問題点がある。また Landsat 画像では林分レベルの計測には、分解能が不足する間

題点がある。これに対し、近年商業化された航空機 Lidar を用いた計測方法には、バイオマスと相関の高い樹冠高が高分解能・面的に計測可能なことから、機械的・自動的なバイオマスの把握が期待される。しかし、航空機 Lidar を用いた計測方法にもパルス密度の精粗や下層木が計測できないことによるバイオマスの過小評価の問題や、実用化が最近であることから過去の情報が存在しないため、過去にさかのぼった把握や時系列的な解析が不可能といった問題もある。また、リモートセンシング計測の精度を上げるためには、グラウンドトゥルースとしての地上調査データをできるだけ多く整備することが重要である。しかし、地上調査を従来の手法で行うには時間と労力がかかり、多くの計測を行うのは困難である。

本研究は、これら従来のバイオマス計測方法の問題点の克服を試み、精度の高い広域森林バイオマスの把握を機械的に展開できる方法の体系化をすすめようとしたものである。具体的な研究課題は、1)「単木法」を用いた航空機 Lidar によるバイオマス計測、2)「森林体積法」を用いた航空機 Lidar による計測と航空写真による時系列解析、3) 地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測の各手法の開発・構築である。それぞれの研究方法、結果を以下に記す。

1)「単木法」を用いた航空機 Lidar によるバイオマス計測（3章）

航空機 Lidar データから立木本数・樹高を計測する単木抽出法を用いて、針葉樹人工林と天然林のバイオマス計測を試みた。樹冠抽出には航空機 Lidar データに Watershed 法を適用する方法で、上層木の抽出と樹高の計測に成功した。また、これまで森林管理において整備されてきた既存の資料である材積表（立木幹材積表・密度管理図・航空写真林分材積表）を用いて、材積の算出を試みた。航空機 Lidar では下層木の計測が不可能なため、単木材積表・密度管理図を用いた方法ではバイオマス量の過小評価傾向があったが、空中写真林分材積表を用いることで下層も含めた林分バイオマスを計測することが可能となった。次に、時系列の航空機 Lidar データを用いたバイオマス変化を計測するために、さらなる計測精度の向上を試みた。時系列の航空機 Lidar 計測で問題となるパルス密度に依存した樹高の計測誤差を、高密度時の計測樹高と低密度時の計測樹高間の相関式を用いることで補正することに成功した。また、立木幹材積表を用いる方法でも、下層木が計測できないことによる過小評価を補正

するため、上層木構造に穂積の MNV 法を適用して下層木構造を推定することでバイオマスの補正に成功した。この結果、広く一般に使われている立木幹材積表を用いることで林分の樹高・バイオマス成長を精度良く計測することが可能となった。しかし、天然林では単木の抽出精度の低下が避けられないことが判明した。以上より、単木法による航空機 Lidar データの解析は、天然林での計測に課題が残るものの、梢端の明瞭な針葉樹人工林の成長計測手法として有効であることが明らかとなった。

2)「森林体積法」を用いた航空機 Lidar による計測と航空写真による時系列解析（4章）

単木法で課題が残った天然林において、樹冠面と地表面に挟まれた空間である森林体積と地上調査で計測したバイオマス量との相関式を作成することによって、バイオマス量の算出に成功した。ただし、単木法では既存の材積表を用いることで必ずしも地上調査は必要ではないが、森林体積法では既存の資料がないことから、地上調査が必要という課題が残った。また、航空機 Lidar による地表面高は過去においても不変であると仮定し、既存航空写真からステレオマッチングにより樹冠表面高データを作成することで過去の森林体積の計測が可能となった。さらに、現在の森林体積-バイオマス相関式を適用することで、過去のバイオマス量の算出に成功した。また、過去の樹冠表面高データの変化を利用することで、森林の伐採木の検出、材積変化の計測が可能となった。以上より航空機 Lidar の解析には、針葉樹人工林では「単木法」、天然林では「森林体積法」の適用が妥当であることが明らかとなった。また、過去にさかのぼった把握や時系列的な解析を可能とする方法としては、航空機 Lidar と既存航空写真を用いた時系列解析方法を考案し、有効な手法であることも明らかにした。

3) 地上リモートセンシングを用いたバイオマス計測（5章）

航空機 Lidar データを「森林体積法」で解析する場合は、地上情報との関連把握が最も重要となる。このことから、簡便で高精度な地上調査手法を開発することを目的に、地上レーザスキャナを用いた単木解析、地上レーザスキャナを用いた林分解析、魚眼写真を用いた単木解析、写真測量を用いた林分解析を試みた。レーザスキャナを用いた単木解析では立木位置は精度良く計測できたが、複数計測点からのデータ接合の困難さや計測点から離れた場所に存在する立木の計測精度の

低下から、材積・炭素重量を求めるには課題が残った。レーザスキャナを用いた林分解析では計測データにビッターリッヒ法の拡張である箕輪法の適用を試み、自動的かつ既存の材積表を必要とせず、高精度なバイオマス計測が可能となった。しかし、機器の価格が高価であるため普及に課題が残った。写真を用いた単木解析では、立木位置・胸高直径の現地調査を簡単に行える一方、内業に大きな負担がかかる課題が残った。写真を用いた林分解析では、二方向から撮影した画像をステレオマッチングするデジタル写真測量を用いることで、地上レーザスキャナと同様のデータが取得可能となった。さらに箕輪法を適用することで、ほぼ自動的に材積を計測することが可能となった。

6.2 森林動態調査への活用例

森林の管理に際しては、一般に長期的かつ大面積での計画が必要であり、人為・天然による攪乱によってひきおこされる森林の不均一性を基礎に管理計画をたてる必要がある。そのような攪乱の性質を決めるのが回転時間・攪乱サイズ・交代期間・成熟時間といった攪乱体制（中静・山本 1987）であり、その結果として見ることができるモザイク構造（伊藤・寺岡 1993）である。このような攪乱体制やモザイク構造を把握することは森林の動態を考える上で、また森林の計画を立てる上でも重要なことである。しかしこれまでの研究では、短期間・小面積でおこなわれたものが多く、長期・大面積における攪乱体制を把握する研究は不十分な状態である。それに対し、長期・大面積プロットを設定した組織的な調査の必要性が論じられ（中静 1991, 本間 2001）ており、近年 JaLTER (Japan Long-Term Ecological Research) として整備されつつある（柴田 2003）。しかしこれらの調査はプロット設置後十数年しかたっており、また数 km²といった地域全体をカバーするプロットの設置は実行上不可能である。このため、数十年・数 km²といった超長期・超大面積の森林動態を計測し解明するためにはデータの蓄積が不十分であり、現在もお課

題として残っている。このような状況を解決する方法として考えられるのが、リモートセンシング手法で航空写真を用いる方法である。そこで本項では本研究で得られた成果を用い、超長期・超大面積調査を行う。

調査は北海道北部に所在する北海道大学北方生物圏フィールド科学センター森林圏ステーション天塩研究林の351林班において行った。当林班では施業を行った記録はなく、原生状態に保たれていると考えられる。1972年12月の湿雪により被害をうけたとされる林分（加藤・松田 1986）を含むように1993年に70m×90mの調査区（Plot W）を設定し、毎木調査を行った。さらに Plot W 内に70m×5 mの帯状区（Plot WB）を設定し、毎木調査と成長錐によるサンプリングを行った。また、広域にわたって森林の時間変化を追跡するために航空写真デジタル写真測量解析を行った。写真測量解析には 1984・1999 年撮影の航空写真を使用した（Table 6.2.1）。

航空写真上に GCP をとって標定を行い、さらに空中三角測量計算を行い、写真の外部標定要素（撮影時の x, y, z 座標値および傾き角度である ϕ, ρ, κ ）を算出した。調査地は周辺に道路や建物の様な明瞭な地物が少ないため、森林基本図（1:5,000）と航空写真との対応点を探すのが困難であった。そこで当該林分で取得されたレーザ計測データ（2004年計測、パルス密度0.25m⁻²）から DSM を作成し、この DSM 上の点と写真上との対応を探し GCP とした。次に外部標定要素が付いた航空写真のステレオペアを用い、画像マッチング処理を行うことで写真撮影時の DSM を再現した。さらに森林の変化を抽出するために、レーザ計測によって計測された DTM との差を計算して DCHM を算出した。この DTM は研究の対象期間中に変化していないものと仮定した。データはノイズを除去するために、メディアンフィルターを用いて、1 m 解像度のものを 5 m 解像度に平滑化を行って使用した。解析には DCHM による樹冠高を 0-5 m の無立木地、5-10m の低木林、10m 以上の高木林の 3 つの樹高クラスに分けた。次に、1984年と1999年の樹高

Table 6.2.1. Aerial photograph specification for digital photogrammetry.

Date	Region#	Focal Length (mm)	Scale
Aug-1984	84-1	213.80	1:20,000
Aug-1999	99-1	213.80	1:20,000

クラスから9つの遷移パターンを作成し、それぞれの遷移確率を求めた。また、10m以上のクラスから0-5 m、5-10mクラスに遷移した場合を枯死したと仮定し、枯死面積を計測、面積あたりの枯死率から対象林地の回転時間を求めた。以上の解析手順を Fig. 6.2.1に示す。

Plot W の ha あたりの本数・材積・構成比を Table 6.2.2に、樹冠投影図を Fig. 6.2.2に示した。

林内には、かつて林冠木層を優占していたと思われる多くの幹折れによる枯死木が存在していた。この枯死木の ha あたりの本数は、針葉樹108本、広葉樹2本、計110本で、針葉樹が98%を占める。Plot W

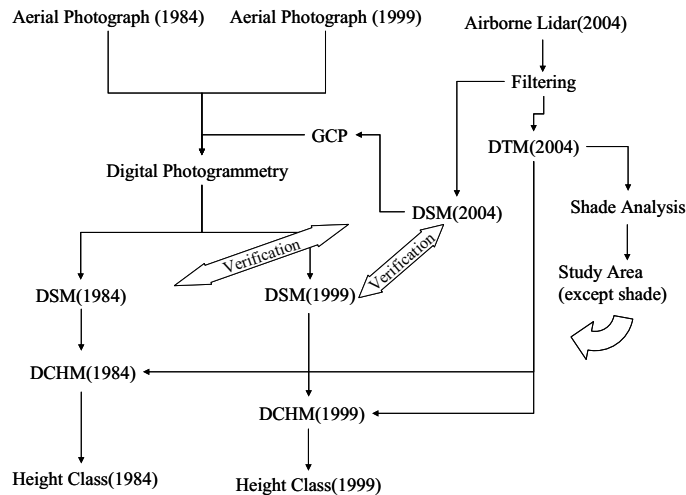


Fig. 6.2.1. Flowchart of analysis.

Table 6.2.2. Number of trees and volume per ha on plot W.

Species	live				Dead			
	number (/ha)	volume (m ³ /ha)	ratio of No. (%)	ratio of vol. (%)	number (/ha)	volume (m ³ /ha)	ratio of No. (%)	ratio of vol. (%)
<i>Picea jezoensis</i>	74.6	64.73	8.2%	35.8%	52.4	104.44	47.8%	66.2%
<i>Abies sachalinensis</i>	319.0	66.17	35.0%	36.6%	20.6	20.66	18.8%	13.1%
<i>Taxus cuspidata</i>	6.3	0.02	0.7%	0.0%				
N					34.9	24.64	31.9%	15.6%
N-Total	400.0	130.93	43.8%	72.4%	107.9	149.74	98.6%	95.0%
<i>Betula platyphylla</i>	6.3	1.55	0.7%	0.9%				
<i>Betula ermanii</i>	38.1	10.49	4.2%	5.8%				
<i>Sorbus commixta</i>	290.5	6.37	31.8%	3.5%				
<i>Acer mono</i>	76.2	2.50	8.3%	1.4%				
<i>Tilia japonica</i>	6.3	0.05	0.7%	0.0%				
<i>Acanthopanax sciadophy.</i>	17.5	0.43	1.9%	0.2%				
<i>Kalopanax pictus</i>	44.4	1.93	4.9%	1.1%				
<i>Mongnolia obovata</i>	6.3	0.78	0.7%	0.4%				
<i>Quercus mongolica</i>	25.4	25.88	2.8%	14.3%	1.6	7.91	1.4%	5.0%
<i>Prunus sargentii</i>	1.6	0.03	0.2%	0.0%				
L-Total	512.7	50.01	56.2%	27.6%	1.6	7.91	1.4%	5.0%
Total	912.7	180.94			109.5	157.66		

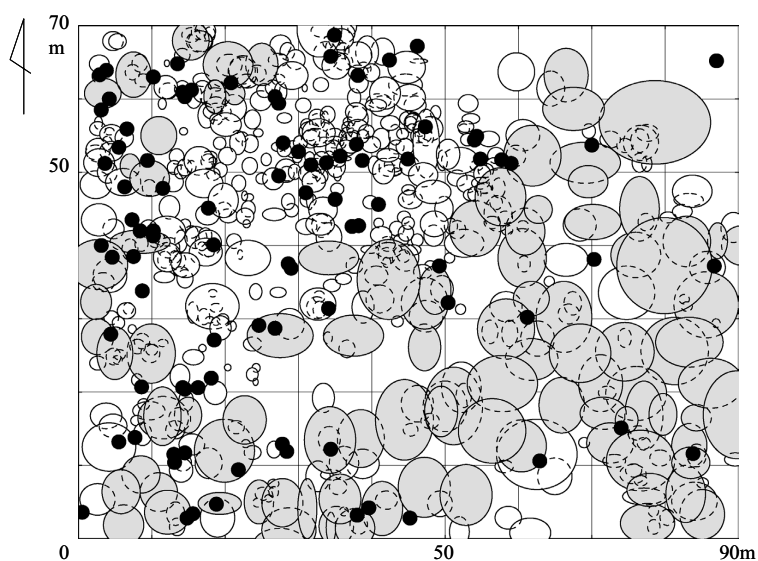


Fig. 6.2.2. Crown projection map on plot W in the year of 1993.

●: Dead Tree ●: Height >10m ○: Height ≤10m

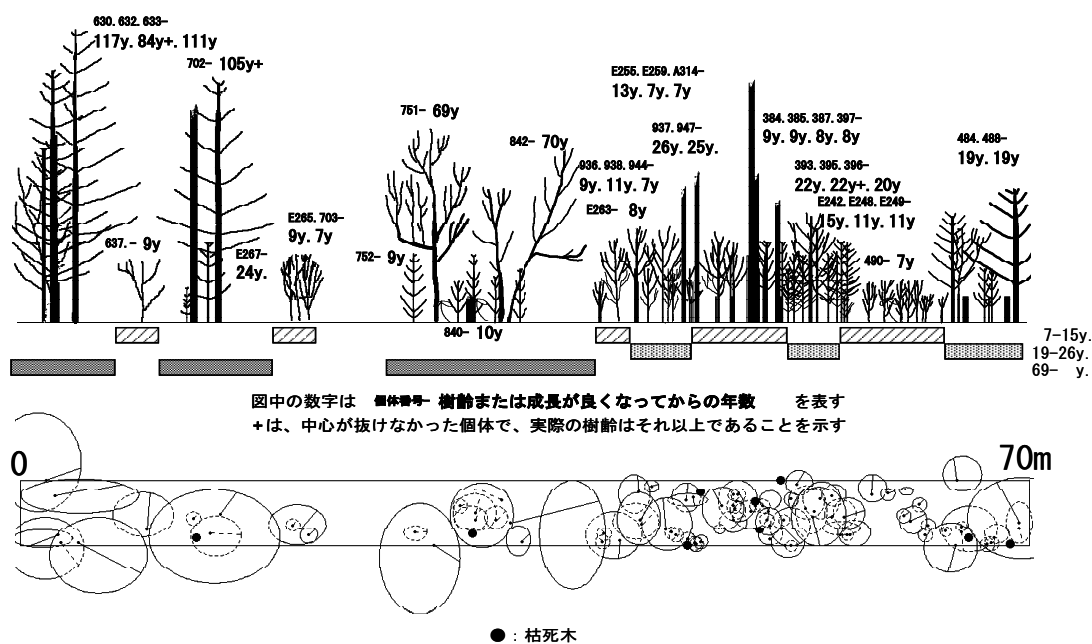
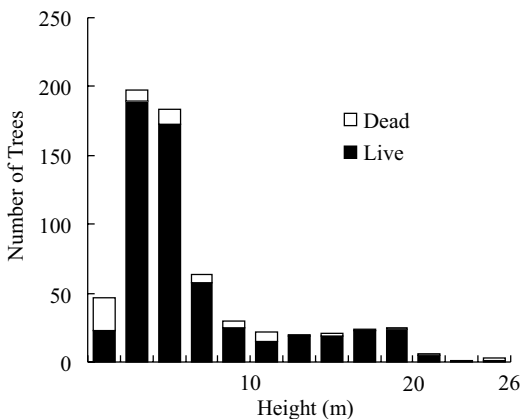


Fig. 6.2.3. Chart of belt-transect on plot WB.

Table 6.2.3. Number of trees plot according to height class on plot WB.

Species	Height(m)		Total
	～10	10～	
<i>Picea jezoensis</i>	1	2	3
<i>Abies sachalinensis</i>	45	7	52
N-Total	46	9	55
<i>Betula platyphylla</i>	2		2
<i>Betula ermanii</i>	3		3
<i>Sorbus commixta</i>	47	2	49
<i>Acer mono</i>	9		9
<i>Tilia japonica</i>	1		1
<i>Acanthopanax sciadophylloides</i>	2		2
<i>Kalopanax pictus</i>	9		9
<i>Mongolia obovata</i>		2	2
<i>Quercus mongolica</i>	2		2
L-Total	75	4	79
Total	121	13	134

**Fig.6.2.4.** Number of trees on plot W.

内に設定した Plot WB の側面図、および樹冠投影図を Fig. 6.2.3 に示した。また、Table 6.2.3 に樹高別本数を示した。Plot WB ではエゾマツ・トドマツ・ナナカマド (*Sorbus commixta*)・ホオノキ (*Magnolia obovata*) 等が高木層を占め、低木層にはトドマツ・ナナカマド・イタヤカエデ (*Acer mono*) 等が多く存在している。

次に階層構造をみるため、Fig. 6.2.4 に Plot W の生木と枯死木の樹高階別本数を示した。これによると、生木の樹高は 4 m 付近と 18m 付近にモードを持

つ 2 山型の分布をしていることが分かる。また、Plot W の再生群落の樹高に関して K-平均法によりクラスター分析を行うと、1～10m と 11～26m の 2 つのグループに分けられる。一方、サンプル木の樹齢と成長が急速に良くなってからの年数 (Fig. 6.2.3) によると、樹高 10m 以下のグループは 26 年生以下の個体であり、10m より大きいグループは 69 年生以上の個体である。以上この林分では、その樹高構成からも時間構成からも明確に高木層と低木層に分けることができた。

さらに林分の変遷をみるため、樹高 10m 以上の高木と枯死木の本数、材積より、破壊前の林分構成を推定した (Table 6.2.4)。これによると ha あたりの本数は 310 本で、針葉樹は 429 本、広葉樹は 60 本となり、針葉樹が 81% となる。また、ha あたりの材積では 320.91m^3 になり、針葉樹は 269.54m^3 、広葉樹は 51.37m^3 となり針葉樹が 84% となる。一方、本数ではエゾマツ、トドマツがそれぞれ 34%、材積ではエゾマツが 51% を占める。このことより、調査林分は破壊前にはエゾマツの大径木を中心とした針葉樹林分であったと考えられる。Plot W ではエゾマツを中心とした大径木が高木層を占め、トドマツ・ナナカマド・ベニイタヤを中心とした小径木が低木層を占めている。以上より、Plot W は破壊を契機に、エゾマツを中心とした針葉樹林分からトドマツ・ナナカマド・ベニイタヤを中心とした針広混交林に推移していると考えられる。

写真測量調査では、最初に作成した DSM の精度検証を行った。検証には、調査地近辺の道路の中心線に沿ってチェックラインを作成し、チェックライン上の航空写真測量による DSM 標高値と、航空機レーザ計測による DSM 標高値の比較を行った。Table 6.2.5 に結果を示す。標高値の RMSE は約 2 m 以下であった。次に、森林部でも同様の精度検証を行った。森林部の全域について、航空写真測量による DSM 標高値と航空機レーザ計測による DSM 標高値の比較を行い、RMSE を算出した。石渡ら (2004) は、高山で林野庁/県庁撮影の航空写真を用いた航空写真測量の精度検証を道路上のデータを用いて行っているが、その誤差は 0.45～1.65m であると報告しており、この結果は本研究と適合する。よって、1:20000 の航空写真を用いた解析では、人工地物標高の誤差は 2 m 以下であると考えられる。しかし、森林部ではこの値より誤差が大きい結果となった。また、本研究の 4 章

Table 6.2.4. Estimated numbers and volumes per ha before the disturbance on plot W.

Species	number	volume	ratio of No.	ratio of vol.
	(/ha)	(m ³ /ha)	(%)	(%)
<i>Picea jezoensis</i>	104.8	162.56	33.8%	50.7%
<i>Abies sachalinensis</i>	104.8	82.22	33.8%	25.6%
N	39.7	24.76	12.8%	7.7%
N-Total	249.2	269.54	80.5%	84.0%
<i>Betula platyphylla</i>	1.6	1.33	0.5%	0.4%
<i>Betula ermanii</i>	25.4	10.32	8.2%	3.2%
<i>Sorbus commixta</i>	12.7	3.46	4.1%	1.1%
<i>Acer mono</i>	3.2	0.32	1.0%	0.1%
<i>Acanthopanax sciadophylloides</i>	1.6	0.12	0.5%	0.0%
<i>Kalopanax pictus</i>	3.2	1.37	1.0%	0.4%
<i>Mongnolia obovata</i>	3.2	0.76	1.0%	0.2%
<i>Quercus mongolica</i>	9.5	33.68	3.1%	10.5%
L-Total	60.3	51.37	19.5%	16.0%
Total	309.5	320.91		

Table 6.2.5. RMSE of the DSM derived from aerial photographs.

Year	RMSE x(m)	RMSE y(m)	RMSE z(m)		
	Check Point	Check point	Road	Forest	Except Shade
1984	0.92	1.17	1.79	5.55	5.34
1999	1.76	1.8	1.34	4.77	4.56

で行った写真測量の誤差である4 mよりも大きな値となった。この理由の一つとしては、山の陰影部における画像マッチング処理の誤差が考えられる。そこで、航空写真の撮影日時から太陽高度・方位を算出し、このデータと航空機レーザ計測によるDSMデータからGIS上で山の陰影部を推定し、解析の対象から除外することにした。この結果、RMSEに改善がみられた。(Table 6.2.5)

次に、樹高変化の解析を行うために写真測量による樹高クラス区分図(Plate 10)を作成した。また、現地調査との比較のため、Plot W付近を抜き出したのがFig. 6.2.5である。Plot Wでは林分の破壊・再生範囲が拡大していたが、このことはFig. 6.2.6の樹高クラス図からも読みとることができる。

1984年から1999年の間の樹高クラスの遷移図をPlate 11に示す。また、樹高クラスの遷移確率をTable 6.2.6に示す。遷移の過程は前後の状況にかか



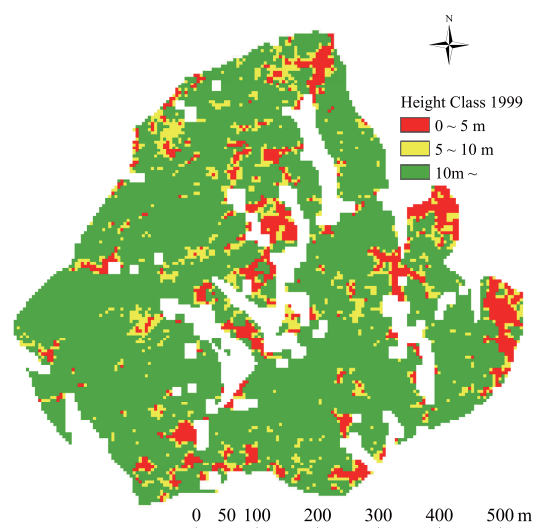
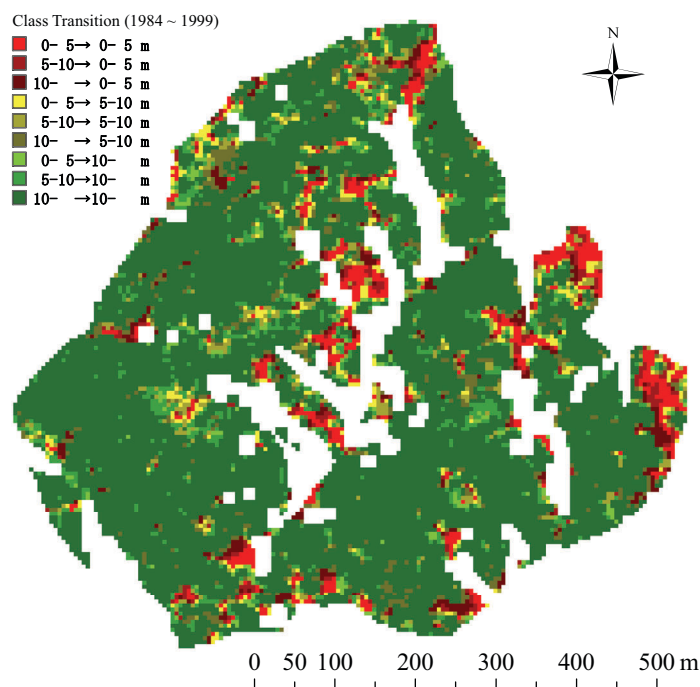
Fig.6.2.5. Height classes analyzed by digital photogrammetry. Upper: Year of 1984, Lower: Year of 1999. Rectangle shows the extent of Fig.6.3.1 Height class; White grid is the exception area. ■:10m ~, ■:5~10m, □: ~5m

Table 6.2.6. Transition probabilities of canopy height classes.

Canopy height class in year 1999(m)	Canopy height class in year 1984(m)		
	0-5	5-10	10-
0-5	0.497	0.192	0.033
5-10	0.281	0.283	0.060
10-	0.222	0.525	0.908

Table 6.2.7. The observed and equilibrium rate in each height class.

	Canopy height class (m)		
	0-5	5-10	10-
Observed in 1984	0.101	0.130	0.769
Observed in 1999	0.100	0.111	0.788
Equilibrium	0.092	0.103	0.805

**Plate 10.** Height class map. Colors show the height class delivered from aerial photos and lidar. White spaces are the exception areas in this study.**Plate11.** Changes of height class. Colors show the transition of height classes derived from two annual photographs. White spaces are the exception areas in this study.

わらず一定であるマルコフ過程であると仮定して、各クラス別面積比が均衡状態になるまでこの遷移を繰り返した（Tanaka and Nakashizuka 1997）結果をTable 6.2.7に示す。この均衡時の面積比は、1984年、1999年の面積比に近い結果となった。したがって、得られた遷移確率は妥当なものであると考えることができる。よって、この遷移確率から死亡確率を算出し、写真の撮影間隔である15年から死亡確率を除することで森林の回転時間を算出することができる。死亡を（10-）クラスから他のクラスへ遷移した場合と定義した場合の死亡面積は、24,675m²、全樹冠面積は347,875m²であったため、回転時間は約211年と推定することができる。

本調査地に近い天塩研究林の214・215・216・220・221・222林班において広範囲から集材された伐採木の年輪を調査した矢島（1981）によると、樹高0.3mにおけるエゾマツの最大年輪数は322本、トドマツは226本であり、それぞれ100～260本、100～140本の個体数が多いとしている。樹高0.3mまでに成長するのに要する年数の最大はそれぞれ23年、22年と報告されているので、樹齢はおおよそ120～280年・120～160年で、最大約350年・250年であると言える。また、

樹高0.3m～3.95mに成長するのに要した年数は7～117年、6～83年である。この年数を被圧から解放されるまでの年数と仮定すると、伐採木が被圧から解放されてからの年数はそれぞれ最大で230年～340年、170年～240年となる。これらの年数と本調査地の回転時間の約200年は近い値を示しており、妥当な結果が得られたと考えられる。

本事例では35ha、期間、15年を対象として、デジタル写真測量解析を用いることで樹高クラスの変化を検出することが可能であり、対象林地の回転時間を算出することができた。航空写真は過去60年にわたり日本全国のものが入手でき、本手法により長期・広範囲の調査が可能となるため森林動態の調査に適した手法であると考えられる。

6.3 広域森林バイオマス計測計画と高精度化へのアプローチ

北海道大学天塩研究林においては、2004年6月～9月にかけて全林を対象にレーザ計測（パルス密度約1 m⁻²）で計測が行われている。当該研究林は主に天然林を中心とする森林であるため、本研究の森林体積法の成果を用いながら、このデータを利用してレーザ

Table 6.3.1. Forest Area and Suggested Sample Plots.

Stand Class (Outline)	Stand Class (Details)	Area (ha)	Number of Sample Plot
Coniferous Forest	Coniferous - Dense Forest	921.8	2
	Coniferous - Middle Density Forest	1937.5	6
	Coniferous - Open Forest	1103.0	3
	Coniferous - Scattered Forest	150.6	
Mixture Forest	Mixture - Dense Forest	2545.0	8
	Mixture - Middle Density Forest	3423.8	11
	Mixture - Open Forest	2123.4	6
	Mixture - Scattered Forest	464.2	1
Broad-leaved Forest	Broad-leaved - Dense Forest	3705.8	12
	Broad-leaved - Middle Density Forest	1790.8	5
	Broad-leaved - Open Forest	1298.1	4
	Broad-leaved - Scattered Forest	751.3	2
Artificial Forest	Artificial Forest	1168.2	4
Secondary Forest	Secondary Forest	316.4	4
Alpine Vegetation	<i>Pinus pumila</i> Forest	10.1	
	Alpine Vegetation	47.0	
Treeless land	Moor	5.3	
	Treeless with Sasa	561.4	
	Treeless with harb	39.3	
	Cliff	0.8	
	Slided Land with Harb	72.1	
	Slided Bare Land	46.9	
Others	Arboretum	27.4	
	Building Site	29.6	
	Others	26.5	
SUM		22566.4	68

計測材積式の調製と全林材積の推定を行う方法とをとりまとめる。

林分材積を測定する方法としては、全林法と標準地法がある。ある測定対象林地の材積を調査する場合、全林調査することが理想である。しかし広域が対象となると調査対象全体を実測することは不可能であり、標本を抽出し全体を推定するという手段をとる場合が多い。この方法は標本調査法と呼ばれている。

標本調査法では標本抽出誤差を一定精度に保ち、調査費用と対比しながら標本の抽出単位と個数を決定することが基本的な課題である。また、標本地の抽出方法には大きく分けて、単純無作為抽出法・層化無作為抽出法・系統的抽出法・福次抽出法・二重抽出法がある。単純無作為抽出法は、恣意・偏りが入らないように無作為に標本を抽出する方法である。層化無作為抽出法は、調査対象をある似通った群にわけて標本を抽出する方法で、同一標本数であれば推定精度を向上

させることができる。系統的抽出法は、標本を一定単位ごとにとる方法である。森林調査では無作為に標本を設定することは困難なため、系統的抽出法が用いられることが多い。副次抽出法は、対象をいくつかの部分に分割し、そのものを抽出単位として抽出する方法である。二重抽出法は、コストがあまりかからない資料があり、その資料から標本抽出してそこから推定された値を利用して、全体を推定する方法である。

航空写真による材積査定では、二重抽出法が多く使われている。たとえば、経営計画区の全材積を推定する場合に大標本として多数の標本地を航空写真上に抽出し、さらに小標本を抽出する。小標本の現地調査と判読パラメータ（樹種・樹高・疎密度等）の関係から材積式を作成し、大標本の材積を推定する。さらに大標本の材積から全林の材積を推定するのである。また、抽出すべき小標本数（ nS ）と大標本（ nL ）はそれぞれ次の様に与えられる。

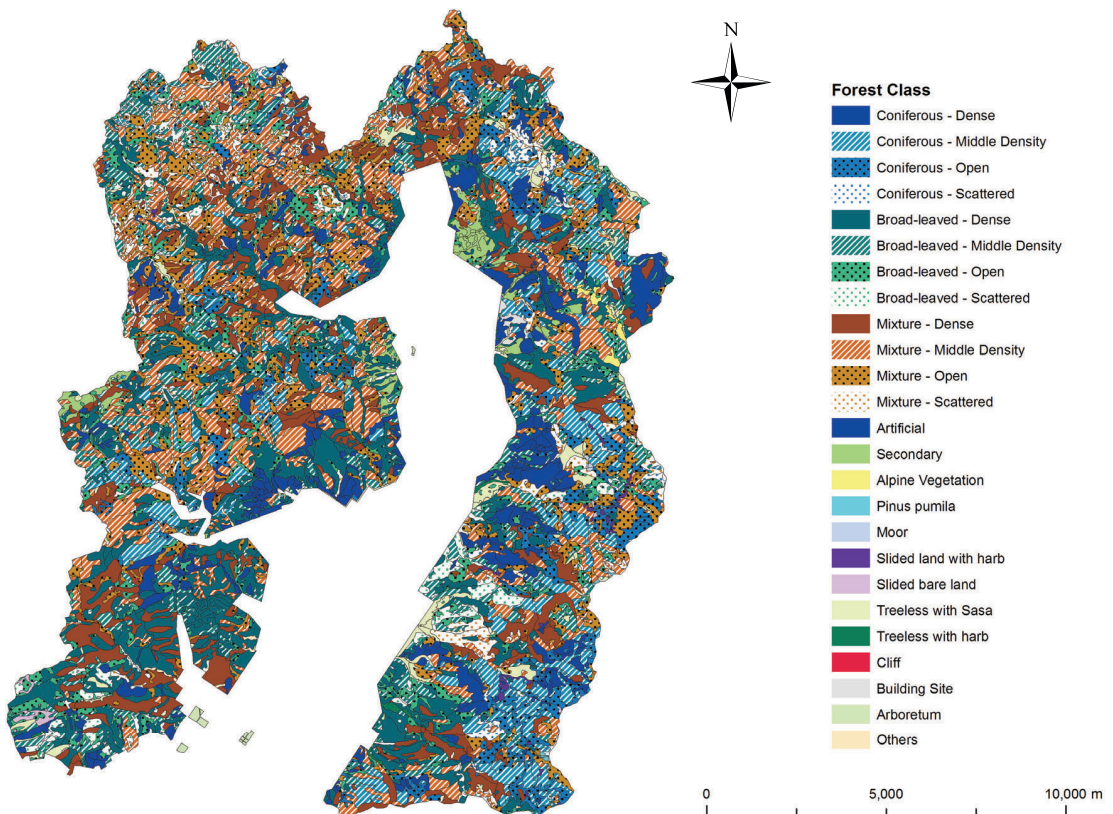


Plate 12. Forest classes read from aerial photos.

$$n_s = \left(\frac{2C_v}{E} \right)^2 \left[(1-\rho^2) + \rho \sqrt{1-\rho^2} \sqrt{\frac{C_L}{C_S}} \right],$$

$$n_L = n_s \sqrt{\frac{\rho^2}{1-\rho^2}} \sqrt{\frac{C_S}{C_L}} \quad (6.3.1)$$

ここで、 E は目標精度、 ρ は判読値と実測値の相関係数、 C_v はプロット材積の変動係数、 C_L, C_S は大標本および小標本それぞれ1個あたりの経費である。今、 $E = 0.1$ 、 $C_v = 0.50$ 、 $\rho = 0.60$ 、レーザ計測データはすでに取得済み、全林のDCHMが計算されていると仮定すると $C_L \rightarrow 0$ なので、 $C_L/C_S \rightarrow 0$ 、 $C_S/C_L \rightarrow \infty$ となり、 n_S は64、 n_L は ∞ となる。 n_L が ∞ 、つまりレーザ計測は全林が計測対象となるが、これはコンピュータ上で容易に処理することができる。この64個の標本数を研究林で作成した林相層別(Plate 12)に面積配分したのが、Table 6.3.1である。林相層を8つの大項目層に分け、針葉樹・広葉樹・針広混交林・人工林・二次林に配分したものの中で、標本点が4つに満たないものは4つの標本点を配分した。この結果、68個の標本点が必要ということになる。なお、高山群落・無立木地については森林材積がほとんどないため除外した。その他についても施設等であるため除外した。

現地調査の方法として毎木調査法を用いる場合、プロットのサイズが問題となる。小さいプロットはプロット間の変動が大きいと設定の時間が短くてすみ、大きなプロットは変動が小さいと設定に長い時間がかかるため、コストと精度を検討して適切なサイズを選ぶ必要がある。大友(1957)はプロット間の変動係数の研究を行い、変動係数が一定の値を示す限界として、少なくともプロットには80本含むこととし、天然林においてはプロット面積を0.08~0.15haとすることを提唱している。また谷口(1962)は、天塩演習林(当時)において天塩演習林の材積査定を行っているが、プロットサイズは0.25ha(50m×50m)としている。またこの時、プロットの工期についても検討を行っており、プロット1つあたり3人で180~370分かかるとしており、その多くの時間(90~260分)が現地への歩行時間だとしている。実際の毎木調査にかかる時間の割合が少ないため、プロットの面積が0.15haであっても0.25haであっても工期はあまり変わらないと推測されるので、0.25haプロットを用いるのが妥当と考えられる。また、調査にはこの他に打ち合わせや

車での移動時間もかかることから、1つの調査班が1日に行うことのできる調査点は1地点と考えられる。このことから、現地調査には64地点×3人日/地点=192人日の工期がかかると思積もることができる。現地調査が終了すれば、大項目層毎にデータを取りまとめ、大項目層別のDCHMと材積の回帰式を作成し材積式を作成することになる。また、全林のDCHMと先の林相図に調製した材積式をあてはめることで、全林の材積を推定することができる。

以上の工程で、全林材積の推定が可能であるが、さらに精度向上を行う場合次の2つアプローチが考えられる。

一つのアプローチは標本点を増やす方法である。その方法としては、先の大項目層別に標本点を増やす方法があり、この場合、材積式のフィッティングが良くなり精度が向上することで全林の推定精度向上が期待できる。また、別の方法では、空中写真林分材積表Ⅱ型(渡辺 1993)の考えを用いて、材積や生育に相関が高いと思われる層(たとえば、方位・傾斜・凹凸度・地層・土壌・微地形等)を増やし、それぞれに標本点を配分する方法がある。材積に相関の高い層が増えることで、全林の推定精度の向上が期待できる。現地調査は、なるべくレーザ計測の取得年次に近い年次に行うのが望ましいが、それが難しい場合は4章で示した様に写真測量から作成したDCHMも同様に扱えることから、たとえば北海道庁により撮影される航空写真の撮影前後に現地調査を行い、写真測量によるDCHMと現地調査の材積との間で材積式を求めることも可能である。この場合、求めた材積式をレーザ計測によるDCHMに適用すれば、レーザ計測時の材積をより精度良く推定することができる。また、航空写真撮影年度の材積推定をする場合は、写真測量手法で全林のDSMを作成し直すか系統的抽出法の考え方で一部についてのみDSMを作成し、これを二重抽出法の大標本として利用する方法が考えられる。いずれにしても標本点を増やすことになるが、ここで、たとえば5章5項で行った写真を用いた林分解析を併用するとすれば、1地点3人日かかる調査が1人日で行うことができると考えられ、調査にかかる時間とコストを抑えることができると考えられる。

二つ目のアプローチは、単木法を用いる方法である。この方法は、計測データから普遍的法則やより小スケールの知見を用いて実材積を推定する点で優れている。たとえば、3章で試みたようなMNY法で下層

木を推定したのち単木材積を積み上げて林分材積を推定する方法や、樹冠－胸高直径のアロメトリー式を用いて単木材積を積み上げる方法である。これらの方法は、DCHMと材積との関係に理論的な解釈をつけることができる点で優れており、また既存の立木幹材積表が利用できるため空中写真材積式を調製していない地域においても利用できることが期待される。

標本点を増やして精度を上げる方法は実用的であるが、一般化には労力がかかる。一方普遍的法則を用いる方法は、労力がかからないかわりにすべての法則を導くには時間がかかる。実際には、標本点を増やしながら社会的・学問的なニーズのある対象の法則を解明して計測精度を向上させていくのが現実的な進め方だと考えられる。

6.4 おわりに

今後、本研究成果に基づきながらより高精度な計測を目指す方法として、バイオマスとの関連性の高い葉面積密度の層構造を利用する方法が考えられる。武田ら（2005）は、航空機Lidarを用いた層別葉面積密度分布の広域推定に成功しており、この葉面積密度と本研究での森林体積法を用いることでバイオマス計測精度の向上を図ることが可能である。さらに、森林体積・葉面積密度とバイオマスとの相関関係についての理論的研究を行うことで、より精度の高い計測技術として発展させていきたい。

一方、空中写真測量の手法については引き続き過去の林分構造計測の研究を行い、森林管理・森林環境評価の研究へ展開させていきたい。また、地上レーザスキャナ・地上写真測量を用いた手法については本研究では一定仰角のデータのみを使用した、データとして取得できる全ての仰角のデータが使用可能ならば確率論的に安定すると考えられる。これに基づき、地上レーザスキャナ・地上写真測量データに適応したピッターリッヒ法・箕輪法の理論的拡張も同時に進めていきたい。

最後に、本研究で得られた知見を用いて実践的研究を行うことで、広域森林バイオマス計測手法の普及と研究の活性化を図っていく所存である。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの笹賀一郎教授には終始、懇切丁寧な御指導、ご鞭撻、御援助を賜りました。北

海道大学大学院農学研究科の高橋邦秀教授、中村太士教授、国立環境研究所の山形与志樹博士には論文の校閲と、大変貴重かつ適切な御指導、ご助言を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

また、本研究の遂行に際し、公私にわたり多大なご協力と有益なご意見および御討論を頂いた、国立環境研究所の藤沼康実博士、小熊宏之博士には深甚なる謝意を表します。北海道大学大学院農学研究科の和孝雄名誉教授、筑波大学生命環境科学研究科の小鹿勝利教授には、研究にあたってのご指導を頂きました。技術士事務所森林航測研究の板垣恒夫技術士には、空中写真判読のご指導を頂きました。国立環境研究所の武田知己博士、中路達郎博士、(株)パスコの福士亮太氏、洲浜智幸氏にはご協力と有益なご意見を頂きました。北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの藤原滉一郎名誉教授、佐藤冬樹教授、日浦勉教授、秋林幸男助教授、野田真人助教授、門松昌彦助教授、吉田俊也助手、高木健太郎助手、菅田定雄技術員、福井富三技術員、間宮春大技術員、守田英明技術員、山ノ内誠技術員、小宮圭示技術員、上浦達哉技術員、竹田哲二技術員、高橋廣行技術員、金子潔技術員、瀬崎由理子氏、岡崎まち子氏ならびに同センターの職員の方々には、長期観察林・照査法試験林の貴重なデータを提供していただくとともに、調査・研究・論文の作成にあたり多大なご協力・ご助言をいただきました。苫小牧フラックスリサーチサイトの維持・管理を行っている、国立環境研究所の犬飼孔氏ならびに同研究所職員の方々、北海道森林管理局の職員の方々には、貴重なデータを提供していただくとともに、調査・研究にあたりご協力をいただきました。北海道立環境科学研究センターの高田正之氏、安井陽一氏、(株)エコニクスの藤田玲氏、元北海道大学大学院農学研究科の石崎英治氏には、調査・研究にあたりご協力をいただきました。空中写真林分材積表の収集にあたっては、(株)エコニクスの油津雄夫技術士、森林総合研究所の鷹尾元博士、元日本森林技術協会の渡辺宏技術士にご協力いただきました。北海道大学大学院農学研究科の平野高司助教授には写真測量解析機材のご提供をいただきました。(株)パスコの島村秀樹博士には激励を頂きました。ここに深く感謝いたします。また、精神面で応援くださった家族の者、特に亡き母に感謝いたします。本研究は、以上の方々を始め、多数の方々のご指導、ご協力のもとに達成できたものであり、ここで関係各位の皆様に感謝いたします。

なお、本論は「北海道大学審査学位論文」を再構成したものである。

引用文献

- 合沢義孝・板垣恒夫・石川善朗・谷口信一 (1969): 航空写真による天然林の蓄積推定, 北大演業務資料, 14, 25-42.
- 栗屋善雄 (1988): 森林資源調査リモートセンシングによる伐採地解析, 日本リモートセンシング学会誌, 10(3), 65-75.
- 東 敏生 (1994): 衛星リモートセンシングデータによる林相区分, 森林航測, 173, 6-1.
- Bitterlich W (1947): Die winkelzählmessung. Allg. Forst- u. Holwirtsch, 58, 4-5.
- Bitterlich W (1955): Die weiterentwicklung der optischen zählmessung in der bestandesaufnahme. Allg. Forstztg, 66, 185-186.
- Eshed FE (1955): Estimation of standing timber H, Veenman & Zonen, 60.
- FAO (2001): Global forest resources assessment 2000 - main report, FAO Forestry Paper No. 140, Rome.
- 林 真知・沼田洋一・小熊宏之・山形与志樹 (2001): 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(3), 41-46.
- 平田種男 (1955): Bitterlich 法による樹高の推定, 日林誌, 37, 479-480.
- 本間航介 (2001): ネットワーク研究を軸に日本の LTER の方向性を考える, 日本生態学会誌, 51, 277-282.
- Hozumi K, Shinozaki K and Tadaki Y (1968): Studies on the frequency distribution of the weight of individual trees in a forest stand I. A new approach toward the analysis of the distribution function and the $-3/2$ th power distribution, Jpn. J. Ecol, 18, 10-20.
- Hozumi K (1971): Studies on the frequency distribution of the weight of individual trees in a forest stand III. A beta-type distribution, Jpn. J. Ecol, 21, 152-167.
- Hyypä J, Kelle O, Lehtikoinen 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, 969-975.
- IPCC (1996): Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Reference Manual.
- 石渡佐和子・福井弘道・米 康充・山形与志樹 (2004): 時系列 DSM を用いた高山の天然林におけるバイオマス変動量の解析, 日本写真測量学会平成16年度年次学術講演会発表論文集, 85-86.
- 伊藤 哲・寺岡行雄 (1993): 広域森林管理と森林情報整備の問題点 - 広域森林におけるデータの変動とゾーニング -, 森林航測, 171, 1-6.
- 梶原幹弘 (1966): 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, 1-14.
- 環境庁 (1998): 平成10年版環境白書 総説, 大蔵省印刷局, 東京.
- 加藤正人 (1990): 衛星リモートセンシングと GIS の統合に基づく森林管理の展望, 日本リモートセンシング学会誌, 10(3), 109-117.
- 加藤正人 (1997): 衛星リモートセンシング技術による針葉樹人工林の樹冠疎密度の推定に関する研究, 北海道林業試験場研究報告, 34, 59-96.
- 加藤美栄子・松田 彊 (1986): 針広混交林の小面積風害跡地における更新様式. 北大演研報, 43, 513-541.
- 北村昌美 (1964): 一致高和による林分材積の推定に関する理論的研究, 山形大学紀要 (農学), 4(4).
- 小林祐之 (1995): Landsat MSS データによる地すべり発生前の特徴把握, 日林論, 105, 137-140.
- 児島利治 (2001): 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, 234-235.
- Lefsky MA, Cohen WB and Acker SA (1999): Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests, Remote Sensing of Environment, 70, 339-361.
- Maclean GA and Krabill WB (1986): Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne Lidar system, Can J Rem Sens, 12, 7-18.
- Magnussen S, Eggermont P and LaRiccia VN (1999): Recovering tree heights from airborne laser data, Forest Science, 45(3), 407-422.
- 松本 健 (2000): 空中写真から生成した樹冠面標高図を用いたギャップ判別, 森林研究, 72, 7-13.

- 松本光朗 (2001):日本の森林による炭素蓄積量と炭素吸収量, 森林科学, 33, 30-36.
- 松本光朗・鹿又秀聡 (2002):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, 荏崎.
- 箕輪光博(1976):上部直径にもとづく林分材積の推定, 日林誌, 58(3), 112-115.
- Morisita M (1959): Measuring of interspecific association and similarity between communities, Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. E (Biol.), 3(1), 65-80
- Næsset E (1997): Estimating timber volume of forest stands using airborne laser data, Remote Sensing of Environment, 61, 246-253.
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990):測樹学, 現代林学講義 (10), pp.243.
- 中島広吉 (1948):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.
- 中島 巖 (1961):森林航測概要, pp.265, 地球出版, 東京.
- 中島 巖・樋渡幸男・長谷川訓子・大貫仁人 (1969):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－, 林試研報, 227, 83-239.
- 中静 透 (1991):森林動態の大面積長期継続研究について, 日生態会誌, 41, 45-53.
- 中静 透・山本進一 (1987):自然攪乱と森林群集の安定性, 日本生態会誌, 37, 19-30
- Nelson R. Krabill W and Tonelli J (1988): Estimating forest biomass and volume using airborne laser data, Remote Sensing of Environment, 24, 247-267.
- 和 孝雄・小鹿勝利・神沼公三郎・夏目俊二・米 康充・守田英明・藤戸永志・北条 元 (1998):照査法試験林の施業経過と成績(Ⅱ)－北海道大学中川地方演習林の試験林の分析－ 北大演研報, 55(2), 274-308.
- Nilsson M (1996): Estimation of tree height and stand volume using an airborne LiDAR system, Remote Sensing of Environment, 56, 1-7.
- 西沢正久 (1959):森林測定法, pp.302, 地球出版, 東京.
- Noguchi M and Yoshida T (2005): Factors influencing the distribution of two co-occurring dwarf bamboo species (*Sasa kurilensis* and *S. senanensis*) in a conifer-broadleaved mixed stand in northern Hokkaido, Ecol. Res, 20, 25-30
- 岡川正臣 (2003): LIDAR データからの地表面標高モデル作成手法について, 情報処理学会第65回全国大会論.
- 大金永治・和 孝雄・菱沼勇之介・小鹿勝利・福井富三 (1988):照査法試験林の施業経過と成績－北海道大学中川地方演習林の試験林の分析－, 北大演研報, 45(1), 61-113.
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司 (2000):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(4), 34-46.
- 大政謙次・吉見健司・沖一雄・日坂章・植西マイケル高照 (2001):可搬型イメージングライダーによる樹木のリモートセンシング－樹冠高の推定－, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 30, 131-132.
- 大政謙次・浦野 豊・小熊宏之・藤沼康実 (2002):可搬型 Scanning Lidar データを用いたカラマツ林の樹林マッピングと胸高直径及びバイオマスの推定, 日本リモートセンシング学会誌, 22(5), 550-557.
- Osawa A and Abaimov AP (2001a), Feasibility of estimating stem size distribution from measurement on the largest trees in even aged pure stands, Can. J. For. Res, 31, 910-918.
- Osawa A, Abaimov AP, and Kajimoto T (2001b): Feasibility of estimating total stem volume and aboveground biomass from measurement on the largest trees in even-aged pure stands, Can. J. For. Res, 31, 2042-2048.
- 大島誠一・新田季利・延堂二郎・前崎武人 (1962):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, 14-16.
- 大隅眞一編著 (1987):森林計測学講義, 養賢堂, 東京
- 大友栄松 (1957):森林調査上の問題点とその解明. 経営規定改正資料 pp.45.
- 林業試験場 (1982):木材工業ハンドブック, 丸善
- 林野庁計画課 (1970a):国有林における空中写真林分材積表の作成要領 (案), pp.26.
- 林野庁計画課 (1970b):立木幹材積表東日本編, 日本林業調査会, 東京.
- 林野庁 (2000):人工林林分密度管理図, 日本林業技術協会.

- 佐野滋樹 (2000): DEM の作成方法と精度, 杉盛啓明
ほか編『デジタル観測手法を統合した里山の GIS
解析』, 6-14, 中日新聞社.
- 札幌営林局計画課 (1978): 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.
- Soininen A (2003): TerraScan User's Guide, Ter-
rasolid, Jyväskylä, pp.153.
- 柴田英明 (2003): 大学演習林からフィールド科学拠点
センターへ, 林業技術, 738 8-11.
- 柴崎亮介 (1993): デジタル写真測量の進化, 測量, 43
(7), 17-24.
- 菅藤 武 (1999): 赤色レーザーポインターを利用した
樹幹の任意高指示・測定装置および任意直径の遠
隔的測定装置の考案, 日林誌, 81(1), 85-88.
- 菅原 聡 (1963): 毎木調査における誤差について, 信
州大学農学部紀要, 3(3).
- 末田達彦・日下部朝子・都築勇人・佐々木尚子
(2002): 寒帯林の植生変化検出をめざした航空レー
ザー測距法による広域森林測定. 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, 6-23.
- 州浜智幸 (2001): LIDAR による森林計測, 森林航測,
193, 7-11.
- 高橋廣行・高木健太郎・野村 睦・北條 元・上浦達
哉・小塚 力・坂井 励・米 康充・福士亮太・
小熊宏之・藤沼康実・前林 衛 (2006): 航空機
LIDAR を用いた樹高と森林蓄積量の評価, 日本林
学会北海道支部論文集, 54, (印刷中).
- 鷹尾 元 (1991): 回転カメラによる立木位置と胸高直
径の測定精度, 日林論, 102, 139-142.
- 鷹尾 元・高橋正義 (2002): 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 (天野正博編), 森林総合研究所,
1-5.
- 田村正行・高槻幸枝 (2000): 航空機レーザースキャナ
ーによる樹高計測, 写真測量とリモートセンシング,
39(2), 8-13.
- Tanaka H and Nakashizuka T (1997): Fifteen
years of canopy dynamics analyzed by aerial
photographs in a temperate deciduous forest-
Japan. Ecology, 78(2), 612-620.
- Tanaka T, Yamaguchi J and Takeda Y (1998):
Measurement of forest canopy structure with a
laser plane range-finding method -development
of a measurement system and applications to real
forest, Agricultural and Forest Meteorology, 91,
149-160.
- Taniguchi S (1961): Forest inventory by aerial
photographs, Res. Bull. of the Col. Exp. Forests
Hokkaido Univ, 21(1), 1-80.
- 谷口信一 (1962): 間寒別川流域の森林経営と保全に関
する基礎的研究 - 間寒別川流域森林の測樹学的研
究 -, 北大演業務資料, 4, 23.
- 武田知己・小熊宏之・米 康充・藤沼康実 (2005): 航
空機 LIDAR による森林の葉面積密度分布の測定,
農業環境工学関連 7 学会 2005 年合同大会講演要旨,
77.
- 田代和彦 (2001): 地上据え置き型レーザ三次元計測.
画像による三次元計測, 社団法人日本写真測量学
会講習会テキスト, 27-37.
- Tatewaki M (1958): Forest ecology of the islands
of the northern pacific ocean, J. Fac. of Agr. Hok-
kaido Univ, 50, 371-486.
- 帝国森林会 (1936): 航空写真測量とその応用, pp.82,
丸善, 東京.
- 上野洋二郎 (1979): 林分材積推定の新しい方法 (I),
日林誌, 61(9), 346-348.
- 渡辺 宏 (1993): 最新森林航測テキストブック, 日本
林業技術協会, pp.66, 東京.
- 渡辺定元・遠矢和己 (1960): 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, 336-339.
- 矢島 崇 (1981): 針広混交林における主要構成樹種の
成長過程に関する研究, 北大演研報, 39, 1-54.
- 山形与志樹・小熊宏之・土田 聡・関根秀真・六川修
一 (2001): 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り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(1), 43-57.
- 山形与志樹・石井 敦 (2001): 京都議定書における吸
収源: ボン合意とその政策的含意,
CGER-REPORT. 国立環境研究所, pp.19, つくば.
- 吉村充則 (2001): 林冠プロセスと空間スケール, 科学,
1210-1216.

Summary

The purpose of this study was to develop highly accurate methods, using airborne and ground-based remote sensing, of measuring boreal forest biomass in a wide area and understanding how biomass has changed over time. The following methods were tested on three subjects: 1) In a coniferous plantation, data on upper storey trees were extracted from airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) data using the watershed method and the forest stand structure was estimated from the upper storey data using the MNY method; then forest biomass was calculated from the forest stand structure. 2) For the analysis of a permanent forest and its change over time, the forest volume, which is the space between the surface of the tree crown and the ground, was measured from airborne LiDAR data and old aerial-photographs; then the forest biomass was calculated using a regression formula between forest volume and forest biomass measured by a field survey. 3) In the field survey 2), the forest biomasses were measured using the Minowa method – an extension of the Bitterlich method – from the data obtained by 3D scanning LiDAR and/or digital camera, then the regression formula between forest volume and forest biomass was derived. These three methods were shown to be effective for measuring forest biomass in a wide area.

Key words: Remote Sensing, Photogrammetry, Bitterlich, Biomass Measurement, LiDAR