



Title	航空写真による森林蓄積の推定に関する研究
Author(s)	シトメアン, リスマン; SITUMEANG, Risman
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 42(1), 1-46
Issue Date	1985-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21128
Type	departmental bulletin paper
File Information	42(1)_P1-46.pdf



航空写真による森林蓄積の 推定に関する研究

シトメアン リスマン**

Studies on the Estimation of Growing Stock
by Aerial Photographs

By

Risman SITUMEANG**

目 次

まえがき	2
第1章 緒 言	2
I 研究の背景	2
II 研究の意義と目的	3
III 研究の方法	4
1) 人工林の蓄積推定の研究方法	4
2) 天然林の蓄積推定の研究方法	6
第2章 航空写真と森林調査	6
I 航空写真の特徴	6
II 航空写真による森林調査の沿革	7
III 航空写真による森林蓄積の推定	9
第3章 調査地の概況	10
I 人工林を対象とした地域の概況	10
II 天然林を対象とした地域の概況	14
第4章 人工林の蓄積推定	15
I 対象森林の地位による階層分け	15
II 適用収穫表の決定	19
III 対象森林の立木度の決定	19
IV 森林蓄積の推定	24
V 推定の精度	27
第5章 天然林の蓄積推定	28
I 林相による階層分け	28
II 森林蓄積の推定	28
III 推定の精度	39

* 1984年8月31日受理 Received August 31, 1984.

** ムラワルマン大学林学部

** Faculty of Forestry, Mulawarman University, Indonesia.

第6章 結言と摘要	40
I 結 言	40
II 摘 要	41
参考ならびに引用文献	43
Summary	45

まえがき

航空写真を使用して森林蓄積を推定する古典的な手法は、SPURRによって提唱された判読資料、写真材積表、林分側面積、あるいはこれらと地上調査を併用した方法によって、抽出された各プロットの材積を求め、推計理論にもとづいて調査対象地域の蓄積を推定しようとするものである。

しかしこれまで、航空写真による森林蓄積の推定は十分に活用されていない。このことは推定誤差が大きいことに主たる原因がある。

そこで本研究では、階層分けの基準を従来と異なったものにするこゝで、精度の高い蓄積推定を試みたものである。

この研究をすすめるにあたって、終始御指導を賜わった北海道大学教授大金永治博士、また貴重な御助言をいただいた北海道大学教授東三郎博士、ならびに北海道大学演習林助教授菱沼勇之助博士に深謝の意を表す。また、森林経理学講座の講師の和孝雄先生、同助手の菅野高穂博士にも御世話になった。さらに野外における調査、とりまとめ等に御援助をいただいた北海道大学農学部林学科森林経理学講座の院生、学生の方々、特に、大学院生の野堀嘉裕氏、事務官の樋口順子氏、また北海道大学農学部附属苫小牧地方演習林、青森営林局野辺地営林署の関係各位に深い感謝の意を表す。

最後に、著者にこの研究の機会を与えられた、日本ならびにインドネシア国の文部省に対し、深謝の意を表す。

なお、本論文は北海道大学審査学位論文である。

第1章 緒 言

I 研究の背景

インドネシアは、アジア大陸とオーストラリア大陸とを結ぶ延長線上にあり、東経95～141度、北緯6度～南緯11度の間に位置し、スマトラ、ジャワ、カリマンタン、スラウェシ、西イリアンなど約1万3000個の島々から構成される⁶⁾。

4～11月の乾期には、赤道以北で南西、以南で南東の貿易風が吹き、12～3月の雨期には、赤道以北で北東、以南で北西の風が雨をもたらす。雨量は南東部では比較的少ない。しかし東南アジアの他の国と同じような長い日照りはない。年間雨量が1,000 mm以下の地域は少なく、3,000 mm以上の地域はスマトラ西海岸およびカリマンタンの西部全域と南・東部の高所、ジ

ャワ西・中部とスラウェシ中央部の山岳地帯などにみられるが、全般的には湿潤な風土をもっている⁶⁾。

インドネシアの全森林面積は約1億2000万ha(国土全面積の64%)で、このうちカリマンタンに35%、西イリアンに26%、スマトラに21%、スラウェシに9%、ジャワに2%、その他に7%がそれぞれ分布している。

全森林面積のうち1.5%、約170万haが人工林で、チーク林74万ha、メルクシマツ林42万ha、アガチス林10万ha、その他24万haとなっている。これらは森林植物帯上、大部分が熱帯降雨林に属し、熱帯緑雨林は一部にみられるだけである⁴⁾。

スマトラの森林は、熱帯降雨林で、ここにはメルクシマツ(*Pinus merkusii*)の天然林(中部アチエ)および人工林が多くみられる。カリマンタンの森林も、同様に熱帯降雨林であるが、ここではフタバガキ科(Dipterocarpaceae)の広葉樹が多く、現在インドネシアにおける林業開発の中心地になっている。このほか、熱帯降雨林として、ジャワにチーク(*Tectona grandis*)、メルクシマツ、アガチス(*Agathis alba*)およびモンスーンなどの生育がみられる。一方熱帯降雨林として、アガチス科(*Agathis borneensis*)およびアカシア属(*Acacia auriculiformis*)の樹種を主とする森林が、ヌサテンガラ、ジャワの一部にわずかにみることができ^{6),4)}。

これらの森林はすべて国有林で、このうちジャワはペルフタニ(PERHUTANI=国有林公社)が、その他はコンセショナー(CONCESSIONAIRE=年期特売権者)がそれぞれ森林調査を行い、伐採計画をたてている。この調査における樹種別立木蓄積の測定には、帯状サンプリング調査法が適用されている。またジャワでは、面積・蓄積だけでなく、地位・立木度・地利などが調査され、森林調査法が整備されている。しかしジャワ以外の地域では、伐採量の算定に必要な蓄積推定にのみ主眼がおかれている⁴⁾。

以上述べたように、インドネシアの森林面積は広大で、しかも交通不便な地域にあるため、これを対象とする調査に航空写真を利用することはきわめて有効である。

II 研究の意義と目的

森林調査は、経営計画をたてるための基礎となる。一般にこの種調査においては、次のような基本的データの収集が必要とされる²⁷⁾。

- 1 地況・林況
- 2 蓄積
- 3 利用可能材積
- 4 生長量

このような森林調査、特に蓄積の推定は、経営計画をより効果的なものにするために、重要なものの一つであるし、しかもでき得るかぎり信頼度の高いことが要求される。

インドネシアにおいて、特にジャワ以外の森林は、きわめて広範な地域に分布している。またジャワ以外の地域では、人口密度が低く、労働力に乏しく、また交通も不便である。この

ため森林調査はきわめて困難である。特に地上調査による場合は、多数の人員の確保、作業の長期性、莫大な経費の補償などが要求される。

さらに、インドネシアにおける航空写真の利用は、総体的には第2次世界大戦以後に始まる。しかも林業分野における利用が実現したのは、さらに15年後のことであり、現在なお十分に利用されていない。このことは、航空写真による蓄積推定の誤差がきわめて大きいことに起因する⁶⁾。この課題を解決するためには、鮮明な写真の使用をはかるだけでなく、階層別区分やその解析方法に一層の工夫が必要である。

そこで本研究の目的は、インドネシアのメルクシマツに比較的類似したアカマツ (*Pinus densiflora*) 人工林ならびにインドネシアに広く分布する広葉樹天然林を対象とし、航空写真を利用して、それらの蓄積を高い精度でかつ能率的に推定する方法を確立することにある。

III 研究の方法

インドネシアの森林は、大部分天然生広葉樹林 (90%) で、他にはメルクシマツ、チーク、アガチス (*Agathis lorantifolia*, *Agathis alba*, *Agathis borneensis*) 等の人工林が多い。そこで、この研究では、インドネシアに広く分布する天然生広葉樹林 (写真-1) と、メルクシマツに近いアカマツの人工林を選択して本研究の対象とした。

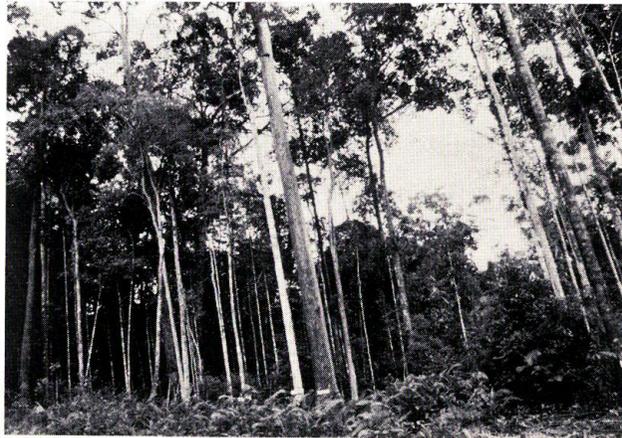


写真-1 インドネシアの天然林の林相

Photo 1. Natural forest stand in Indonesia.

最近インドネシアでは、人工造林の対象樹種としてメルクシマツが最も多く利用されている (写真-2)。しかし日本においては、メルクシマツがないため、これに類似した青森県野辺地のアカマツを対象として研究を進めていくことにした。

アカマツを選択した理由は、第1にメルクシマツが生態的にアカマツに類似している、第2に航空写真の判読において樹冠形がメルクシマツに類似していること等である。

1) 人工林の蓄積推定の研究方法

第1に、本研究に用いた航空写真は、1975年の10月に撮影されたもので、撮影高度1,410

m, 写真縮尺 1/4,600 である。まず航空写真上において主として地位を基準として階層分けを行った。その際地位判定には、主としてデジタルカラー写真を用いた。

第2に、航空写真上で階層分けされたそれぞれの地位をもつ林分の地上調査を行った。地上調査の方法は、40 m × 25 m = 0.1 ha の標準地をとり、胸高直径および樹高を毎木測定し、同時に幹級区分を行った。

第3に、各標準地における樹冠疎密度を航空写真から判読した。一方標準地調査のデータから標準地ごとに収穫表と対照し、立木度を計算した。なお立木度は、標準地材積と、その該当地位収穫表における蓄積との比率である。

第4に、航空写真で各標準地の樹冠疎密度 (X) と立木度 (Y) との関係を $Y = a + bX$, $Y = a + b \log X$, $Y = aX^b$ の各式で求めた。

第5に、航空写真から求めた材積と実測材積との関係は、 $Y = a + bX$ の式で表わし、適合度を検討した。ここで Y は実測材積、 X は航空写真材積である。

第6に、写真上にプロットを Random Sampling の方法で抽出した。この方法で必要な抽出プロット数は比例抽出法により次の式で求めた。まず次式により k を求めた。

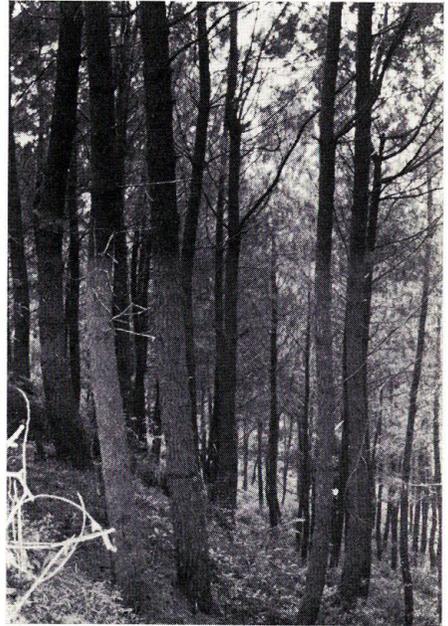
$$C^2(\bar{X}') = \frac{\frac{1}{N^2} (k-1) \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{(\bar{X}')^2} \leq (\alpha/100/K)^2$$

次に上式で求めた k を用い、各層ごと (地位上, 下) の抽出プロット数 ni を次式で算出した。

$$ni = \frac{1}{k} N_i$$

ここで、 N_i は i 層内の抽出単位総数、 σ_i^2 は i 層内の分散、 N は母集団の抽出単位総数、 \bar{X}' は抽出単位の計量、 α は目標精度で、ここでは 0.10、 K は 1.96 である。なお、参考のため NEYMAN 抽出法によってプロット抽出数を求め比較検討した。

第7に、航空写真を用いて、プロットごとに樹冠疎密度を判読した。さらにこの結果にもとづき立木度を求めてプロットの蓄積を推定し、さらに全林の蓄積を 95% の信頼度で区間推定し、その誤差率を求めた。



写真—2 メルクシマツの林相

Photo 2. *Pinus merkusii* stand in Indonesia.

2) 天然林の蓄積推定の研究方法

第1に、人工林では、地位を基準として階層区分を行うのに対し、天然林では、カラー写真により林相を基準として、OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTHの3階層に区分した。

第2に、航空写真上で階層分けされたそれぞれの林相について地上調査を行った。地上調査では、40 m × 40 m = 0.16 ha の標準地をとり、胸高直径および樹高を毎木測定した。

第3に、各標準地における平均可視樹冠直径 (\overline{VCD}) と平均樹高 (\bar{H}) を航空写真から判読した。

第4に、階層分けしたあとで航空写真より得られた \overline{VCD} , \bar{H} を独立変数として、各標準地の材積を従属変数として次式を求めた。

$$V = b_0 + b_1 \overline{VCD} + b_2 \bar{H}$$

$$V = b_0 + b_1 \overline{VCD}$$

ここで b_0 , b_1 , b_2 は回帰常数とした。

第5に、写真上でプロットを層化一段抽出法で Random に抽出した。この方法に必要な抽出プロット数は比例抽出法により次の式で求めた。まず次式により k を求めた。

$$C^2(\bar{X}') = \frac{\frac{1}{N^2} (k-1) \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{\bar{X}'^2} \leq (\alpha/100/K)^2$$

次に上式で求めた k を用い、各層ごと (OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH) の抽出プロット数 ni を次式で算出した。

$$ni = \frac{1}{k} N_i$$

ここで、 N_i は i 層内の抽出単位総数、 σ_i^2 は i 層内の分散、 N は母集団の抽出単位総数、 \bar{X}' は抽出単位の計量、 α は目標精度で、ここでは 0.10、 K は 1.96 である。なお、参考のため NEYMAN 抽出法によってプロット抽出数を求め比較検討した。

第6に、航空写真からプロットごとの可視樹冠直径を判読し、この結果からプロットの蓄積を推定し、さらに全林の蓄積を 95% の信頼度で区間推定し、その誤差率を求めた。

第2章 航空写真と森林調査

I 航空写真の特徴

森林調査は、一般に森林の面積・地形等の調査、森林資源調査、経営計画のための森林調査、売却または購入のための森林調査等に分けられる。

人間が積極的に森林に働きかけ、有形・無形の干渉を行おうとする場合、森林調査からはじめることが多い。森林調査を広範な区域に対して行うにあたり、それが地上調査によるもの

である場合は、多数の人員で長期間にわたり、しかも地利不便な箇所では莫大な費用を要することが多い。このため従来から、航空写真の利用がはかられている^{15),16)}。

森林調査における航空写真利用の利点は、調査の迅速性、記録性、客観性および調査経費の節減などである。これらは、写真像がもつ形状、大きさ、濃度、肌理、そしてこれらが作りだすパターンなどの特性を効果的に利用することによってもたらされる。

さらに森林調査における航空写真利用の理由は、写真のもつ次のような特徴によるものである。第1は、航空写真情報の忠実性である。すなわち航空写真は土地の状況を忠実に記録していることである。つまり土地に関する最も正確な情報源なのである。第2は、航空写真は現地の状況を縮小して保管し、室内でその状況を再現することが可能である。第3は、航空写真は高い所から広い視野をもって地表をとらえた記録であること、すなわち写真を立体視することは、およそ4,000 m くらいの撮影高度から地表を見おろしているようなものである。したがって林道網の設計や、索道・集材機の架線計画にあたっては、きわめて有効である。第4は、航空写真を含む写真技術は、肉眼では確認できない光を画像の色調や濃度として記録し、質的観察能力を拡大することにある⁵²⁾。

II 航空写真による森林調査の沿革

空中より撮影された写真を産業に利用する試みは、1887年にドイツにおいて気球からの森林撮影が行われ、その報告が出された時から始まったといわれる^{26),24),38)}。

第1次大戦以前においても、森林の観察、植生の分布の見取りなどに空中写真が利用されており、カナダにおいては1919年に航空機からの写生図と写真の比較検討による森林調査図が、ケベック州で作成され、経営に使用された。それはまだ航空機に固定撮影装置を装備しない、単一航空写真、または斜写真を主とする時代であった。垂直写真は1908年イタリアで撮影されて以来、地図の作成に応用され始めてはいたが、これが林業に効果をあげ始めたのは1929年、SEELYによって行われた数多くのカナダにおける森林調査と経営計画への試みからである^{31),32)}。

第1次大戦以後、この航空写真に実際的な精度をもった縮尺と連続撮影による重複写真としての効果を加速度的に表わし始めた。

この時代における利用の主体は、まず広大な面積の地域に対する限られた労力による、迅速な地形図・観察図の作成である。そのおもなものには東南アジアをはじめとする熱帯林地方、あるいは1935年より1939年にいたる中国東北地方やカナダなどの未開発林地域の植生調査、アフリカにおける土壌・植生分布図の作成などがある。また1933年には樹種判読の調査が行われた^{18),19)}。

一方1923年にはドイツにおいて、現在の万能自動図化機ステレオプラニグラフ (Stereo Planigraph) が完成した。さらに1923年、ドイツ・ターラント林業大学の HUGERSHOFT は樹高や樹冠測定の研究を始めた。そして林相図の作成や林木の測定、また生長量の査定にすぐれ

た成果をあげた³¹⁾。

第2次大戦以後における注目すべき、またはその後の発展に大きな影響を与えた報告には、以下のような研究があげられる。

1944年以後のアメリカの SPURR による赤外線を初めとするフィルム、フィルターなどの、撮影資材および蓄積査定に関する研究がある。

1948年より現在にいたる、スウェーデンの BACKSTORM, WELENDER, アメリカの CAWCEE, カナダの LOSEE らによる、写真判読に関する研究、また写真材積表についての、MOESSNER, JENSON の研究などがあげられる^{31),41),42)}。

日本において、森林調査の目的で写真利用が大規模に始められたのは、カナダにおけるそれとはほぼ時を同じくした、1930年より1935年にいたる、南カラフトにおける調査である。その後、韓国・北朝鮮・北東中国の森林を対象とする豊富な経験とともに、1940年ごろには関東地方において森林経営のための写真撮影が行われたが、第2次大戦の開始により、終戦までの空白期を迎えた^{16),49)}。

しかし、日本における森林を対象とする航空写真の利用は、森林調査へのそれを中心に、1950年代半ば以降の国有林における経営単位の拡大を契機に、急速に発展しはじめた。そこで、樹種、樹高、樹冠直径、樹冠断面積および材積など、森林諸要素の量的把握のための判断手法にかかわる成果にはみるべきものが多いが、量的把握に終始したために、蓄積推定などの精度の向上には限界があった^{15),16)}。

また1963年頃から、航空写真利用の方向として、森林調査の省力化がうちだされ始めた。このため、コンピュータの導入を背景として、上記のような量的森林諸要素の判断手法や、その精度の向上に関する諸研究が先行し、森林施業への利用にまではいたっていなかった。

ところが1970年代に入ってから、日本に赤外カラー写真やマルチスペクトル写真が導入され、その積極的利用がはかれるようになった⁴⁶⁾。このうち、赤外カラー写真が、最初に計画的に使用されたのは、1971年に科学技術庁が行った、主として大気汚染に関連する都市環境調査においてである。この調査結果は、翌1972年に同庁資源調査会から報告された。一般に、市街地の大気汚染が進行すればするほど、その地域の街路樹や公園樹などの生育に影響を与え、樹葉の変色、異常な落葉、落枝などの現象を誘発することが知られている。上記の調査結果は、このような樹木の生理的異常現象と、赤外カラー写真上で色彩との関連性を分析し、それにもとづいて大気汚染の状況を間接的にとらえたものである。この手法は、赤外カラー写真を利用した樹種や樹木の健全性などの識別に活用されている。

さらに1976年大金^{34),35),36),37)}は、道有林を対象として、航空写真から作成されたデジタルカラー写真を用い、人工林の地位および被害状況などの判定、天然林の林型・林相などの解析、ならびに地表変動の判定を行い、さらに間伐計画への応用などをはかった。これら一連のデジタルカラー写真の研究は、白黒写真の濃度をデジタルカラーに変換することによって行ったも

のである。

一般に波長と濃度とは別個のものであるが、たとえば緑色を取り出してみると、同一樹種に関する限り、一定の範囲で濃度と波長との間に相関関係がみられる。すなわち緑色を中心に青→藍とそれぞれ混色することにより濃色となるが、これは波長が次第に短くなってゆくのである。これに対し、緑が黄→橙→赤とそれぞれ混色することにより次第に淡色となる。すなわち波長が長くなるのである。

III 航空写真による森林蓄積の推定

航空写真を使用し森林蓄積を推定するオーソドックスな手法は、SPURR⁴¹⁾によって提唱された。この方法は、判読資料、写真材積表、林分側面積、あるいはこれらと地上調査を併用した方法によって抽出された各プロットの材積を求め、推計理論にもとづいて調査対象地域の蓄積を推定しようとするものである^{41), 42)}。

判読資料による比較推定では、写真から直接求められる要素について、その林分の代表値を求める。同時にその材積およびそれを構成する要素の実測を行い、これらを一覧にする。これを写真上に設けられたプロットと対比させ、その材積を推定する⁵⁰⁾。

写真材積表には、航空樹木材積表と航空林分材積表がある。プロット材積の査定には一般的に後者が使用される。これは、写真上で直接判読できる立木本数 (N)、平均樹冠直径 (\overline{VCD})、平均樹高 (\overline{H})、平均樹冠面積 (\overline{CD})、樹冠疎密度 (CC) などのいずれか一つあるいはこれらの適当な組合わせと、単位面積あたりの材積との関連性を一覧にしたものである^{1), 50)}。これを作成する材積式には次のようなものがある。

(1) 1変数の場合

$$V = a + bN$$

$$V = a + N^b$$

$$V = a + b \overline{VCD} + c \overline{VCD}^2$$

$$V = a + bN + cN^2$$

$$V = a + b \cdot CC$$

(2) 2変数の場合

$$V = a + b \overline{VCD} + c \overline{H}$$

$$V = a + b \cdot CC + c \overline{VCD}$$

$$V = a \overline{VCD}^b N^c$$

$$V = a + b N + c \overline{H}$$

$$V = a \overline{VCD}^b \overline{H}^c$$

$$V = a + b \cdot CC \cdot \overline{H}$$

(3) 3変数の場合

$$V = a + bN + c\bar{H} + d\sqrt{VCD}$$

$$V = a + bN + c\bar{H} + dCC$$

$$\log V = a + b \log N + c \log \bar{H} + d \log \sqrt{VCD}$$

$$\log V = a + b \log N + c \log \bar{H} + d \log CC$$

林分側面積による方法は⁵⁰⁾、航空林分材積表の一つの変形とみなされるもので、林分の側面積が使われる。このような側面積には、樹高と林分密度が考慮されており、側面積とそこでの実測によって得た材積を関連づけると、側面積による林分材積表ができる。しかしこのような材積表は、世界的にみてもあまり作成されていない。

しかしながら今まで、航空写真による森林蓄積の推定は十分に活用されていない。これは推定誤差が大きいことに起因する。

従来、航空写真による人工林の蓄積の推定においては特に階層分けを行わず、航空林分材積表を用いて森林の蓄積を推定する方法がとられていた。このため精度が低く、その誤差率は、木梨²²⁾によれば20~30%にもなっていた。一方天然林においては従来は針葉樹林、広葉樹林のように林相によって階層分けを行い、さらにそれぞれについて航空林分材積表を調製し、蓄積を推定する方法が行われてきた。この精度も高くなく、アメリカのPAINÉ³⁸⁾によれば、その誤差率は30~70%であると述べられている。

最近、大金は前述のように人工林の地位をデジタルカラー写真により、面として把握する手法を検討し、一定の成果を上げている³⁴⁾。そこでこの研究では、デジタルカラー写真により地位を区分し、収穫表を併用して、蓄積の推定を試みた。また、天然林では、カラー写真により林相を基準としてOLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTHの3階層に区分して蓄積の推定を試みた。

第3章 調査地の概況

I 人工林を対象とした地域の概況

研究対象地域は、青森営林局野辺地営林署管内のアカマツ人工林である。野辺地営林署は、明治19年4月林区署制度が制定された直後の明治19年7月に青森大林区署甲地派出所として発足し、明治21年9月七戸派出所となり、明治22年6月七戸より分割して野辺地派出所となった。その後明治25年7月七戸、野辺地両派出所が併合し、天間林小林区署となり、明治27年2月には野辺地小林区署となった。大正13年2月になって、官制改正により青森営林局野辺地営林署と改められ、さらに昭和22年4月林政統一により帝室林野局野辺地出張所が野辺地第二営林署となった関係から、野辺地第一営林署と改称し、昭和23年1月に第一、第二営林署が併合されて野辺地営林署となり、乙供営林署が新設された⁴⁾。

野辺地営林署の管内図を図-1に示す。野辺地営林署はおおよそ北緯40度33分から40度55分、東経140度59分から141度11分の範囲に位置し、総面積9,422.13 haである。

野辺地事業区はほぼ二つの団地に分けられ、その一つは鳥帽子岳 (720 m) を中心とする山岳地帯であり、地形はおおむね急峻である。他の一つは野辺地川を中心とする丘陵地帯であり、標高 125 m を最高として地形は緩斜または平坦である。

野辺地営林署の平均気温、降水量、最深積雪を表-1 に示す。

当事業区の土壤分布状況は図-2 に示したように、褐色森林土 27%、ポドソル土 8%、黒色土 63%、その他 2% となっている。これらの土壤の地域的な分布状況をみると、褐色森林土とポドソル土が大部分を占めている山岳林地帯と、黒色土からなる丘陵林地帯とに大別される。

野辺地営林署の林相図をもとに各林相ごとの面積と蓄積および生長量を求め

たのが表-2 である。これをみると、人工林が 6,162.93 ha で林野面積の 65% を占め、このうちスギ (*Cryptomeria japonica*) が 2,698.32 ha (29%)、アカマツが 2,215.98 ha (24%)、その他はクロマツ (*Pinus thunbergii*)、カラマツ (*Larix kaempferi*)、ヒバ (*Thujopsis dolabrata*) 等の人工林である。

本研究の対象としたアカマツ林分は、図-3 に示してある。このアカマツ林分 (272 林班) は 55 年生、16.42 ha である。またその地域を含む航空写真は写真-3 のとおりである。

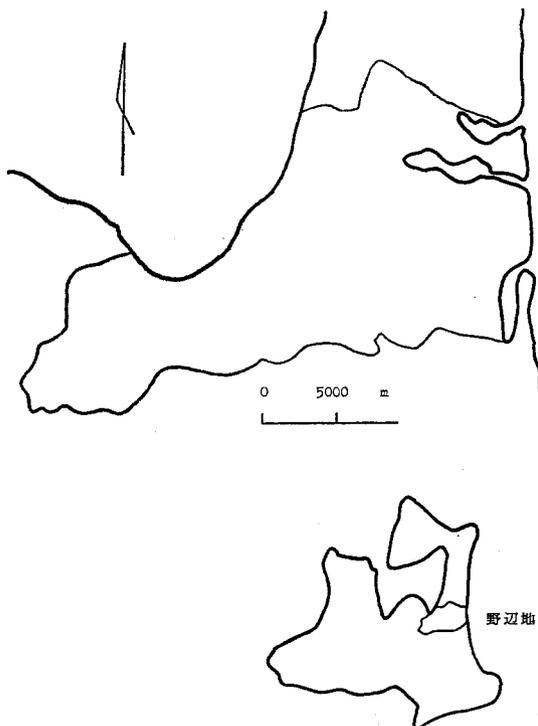


図-1 野辺地営林署の管内図

Fig. 1. Situation of Noheji District Forest.

表-1 平均気温・降水量・最深積雪

Table 1. The average temperature, precipitation and the maximum snow depth in Noheji District

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計	平均
平均気温 (°C)	-1.7	-1.8	1.0	7.7	13.1	16.4	20.9	22.7	18.4	12.4	6.2	0.5		9.7
降水量 (mm)	158	123	104	64	72	110	103	158	156	95	166	157	1466	
最深積雪 (cm)	88	101	97	32										

注 1) 平均気温は昭和 44 年~53 年の平均値、降水量と最深積雪は昭和 49~53 年の平均値である。

注 2) 青森営林局・第 3 次地域施業計画書による。

表-2 各林相ごとの面積・蓄積及び生長量

Table 2. The area, growing stock and increment of each forest stand (Noheji District Forest)

区分	面積 (ha)	蓄積 (m ³)			生長量 (m ³)			
		N	L	計	N	L	計	
林	人工林	6162.93	679322	35552	714874	30676.9	662.6	31339.5
	天然林	2994.82	343091	241219	584310	4057.1	4282.7	8339.8
	無立木地	264.38						
地	計	9422.13	1022413	276771	1299184	34734.0	4945.3	39679.3
除地		1214.29	48084		48084	1526.6		1526.6
合計		10636.42	1070497	276771	1347268	36260.6	4945.3	41205.9
前計		10642.05	1101968	248493	1350461	36397.8	4020.0	40417.8
増減		-5.63	-31472	28278	-3193	-137.2	925.3	787.1

注) 青森営林局：第3次地域施業計画書による。

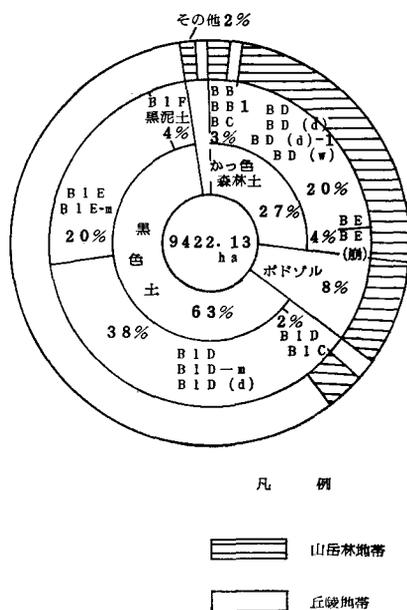


図-2 土壌分布図

Fig. 2. Forest soil type in Noheji District Forest.

注) 青森営林局：第3次地域施業計画書による。

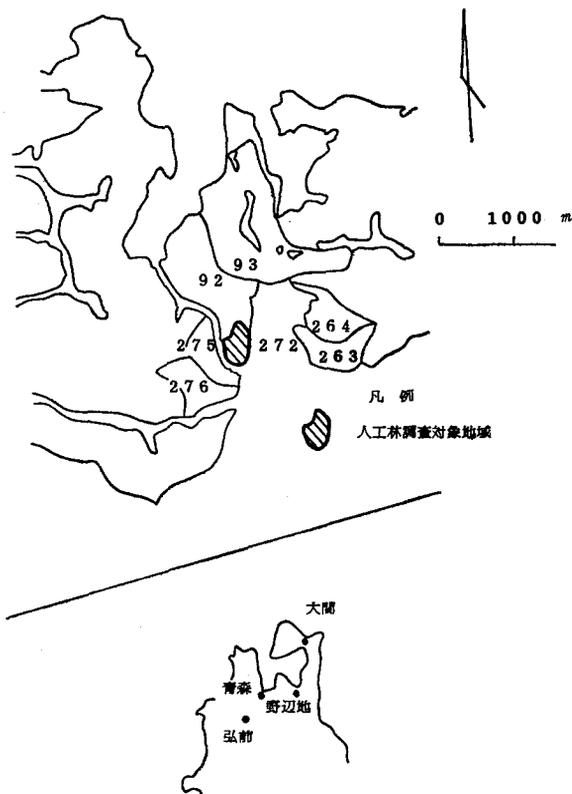


図-3 調査対象地域

Fig. 3. Situation of Noheji District Forest and the positions of investigated area (artificial forest).



写真一3 調査対象地域の航空写真

Photo 3. The aerial photograph of investigated area (artificial forest),

II 天然林を対象とした地域の概況

天然林の研究対象地域は、北海道大学苫小牧地方演習林である。この演習林は苫小牧市宇高丘に所在し、北緯42度40分、東経141度36分に位置する面積2,718 haの森林である。石狩低地帯の南端に広がる勇払原野の西、樽前山の南東にあたり、南は苫小牧市の市街地に接し、太平洋岸からの距離は約4 kmである(図-4)。

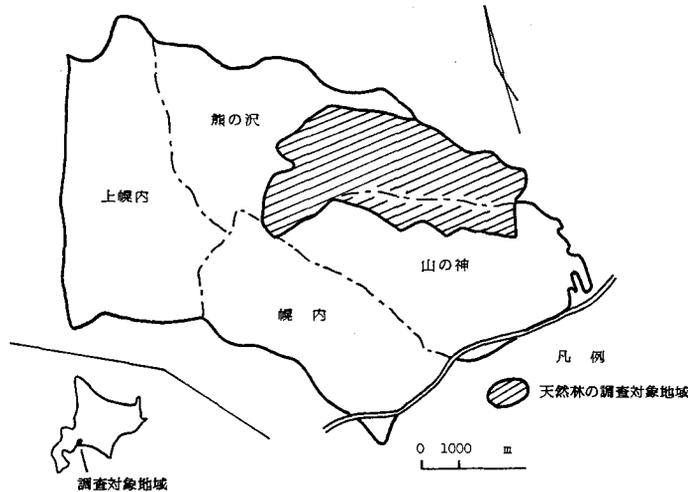


図-4 天然林の調査対象地域

Fig. 4. Situation of Tomakomai Experiment Forest of Hokkaido University and situation of the investigated area (natural forest).

地形は、火山灰におおわれた標高5~90 mの台地で、林内を縦走する幌内川と熊の沢によってほぼ3分されている。多くの小沢があるが、沢は浅く、また尾根筋は広い台地状となっているため、全体として平坦な平地林をなしている。地質はそのすべてが支笏・樽前火山群に由来する火山灰で、その厚さは約1 mときわめて浅い。

北海道大学苫小牧地方演習林気象表を表-3に示す。この表によれば、年平均気温は6.5°C(最高気温35.2°C、最低気温-26.5°C)、年降水量は1,350 mmで、その多くが夏期に集中するため、植物生長期の日照量と気温が他地域に比べて著しく低くなっている。積雪期間は12月上旬~3月下旬の平均104日程度で、積雪量は約50 cmと少ない。このため、低温とあいまって林内で35~50 cm、裸地で70 cm以上にもおよぶ深い土壌凍結が生じ、また凍結期間は4月下旬まで続く。5~8月は南より、9~4月は北よりの風が多く、春と秋にしばしば強風による風害が生じ、また春には放射冷却現象による晩霜害が多発している^{14),17)}。

森林植物帯は、温帯北部林から亜寒帯林への移行帯である汎針広混交林に属し、人工林地の約800 haを除くと、その大部分が天然の広葉樹林である。広葉樹のおもなものはミズナラ(*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*)、カエデ類(*Acer* sp.)、アサダ(*Ostrya japonica*)、ア

表—3 北海道大学苫小牧地方演習林における気象累年平均表 (1956~1965年)

Table 3. Average climatic condition at Tomakomai Experiment Forest of Hokkaido University (1956-1965)

月	平均 気温 (°C)	平均 最高 気温 (°C)	平均 最低 気温 (°C)	10年間の最高, 最低気温 (°C)				平均 湿度 (%)	降水量 (mm)	降水 日数 (日)
				最高 (°C)	起 日	最低 (°C)	起 日			
Jan.	-6.80	-0.82	-12.80	10.2	Jan. 13, 1964	-26.5	Jan. 24, 1960	73.6	59.0	9.6
Feb.	-5.50	0.03	-12.70	8.2	Feb. 24, 1960	-23.0	Feb. 9, 1956 Feb. 10, 1957	73.8	60.2	10.6
Mar.	-2.08	2.13	-7.35	10.0	Mar. 18, 1961	-22.5	Mar. 3, 1956	73.6	66.6	7.0
Apr.	2.90	7.75	-1.56	23.5	Apr. 24, 1961	-12.5	Apr. 3, 1957	74.8	102.2	9.8
May	10.10	14.90	3.70	25.0	May 28, 1958	-6.5	May 9, 1960	73.8	97.0	9.9
June	13.80	17.30	10.96	29.5	June 28, 1961	2.1	June 2, 1963	82.9	121.8	12.6
July	17.67	20.57	14.98	35.2	July 16, 1958	6.0	July 7, 1962	85.3	202.1	15.9
Aug.	19.45	22.70	16.23	31.2	Aug. 23, 1957	5.5	Aug. 22, 1956	87.6	190.6	15.4
Sep.	15.60	20.60	10.10	30.0	Sep. 2, 1960	-1.2	Sep. 28, 1964	80.3	212.6	13.5
Oct.	8.65	14.90	1.66	23.5	Oct. 5, 1965	-10.0	Oct. 26, 1961	75.9	83.3	9.6
Nov.	2.08	7.90	-3.70	17.5	Nov. 5, 1964	-16.5	Nov. 14, 1961	74.5	89.4	9.4
Dec.	-3.90	1.50	-8.96	10.6	Dec. 8, 1963	-21.5	Dec. 24, 1961	75.6	65.7	10.0
年	5.99	10.80	0.88	35.2	July 16, 1958	-26.5	Jan. 24, 1960	77.5	1350.5	133.3

注) 春木雅寛: トドマツ人工林の物質現存量に関する基礎的研究
北海道大学農学部演習林研究報告 第36巻 第1号 164pp 1979による。

オダモ (*Fraxinus sieboldiana*), ハリギリ (*Kalopanax pictus*), ドロノキ (*Populus maximo-wiczii*), シナノキ (*Tilia japonica*), サクラ類 (*Prunus* sp.), カンパ類 (*Betula* sp.), サワシバ (*Carpinus cordata*), アズキナシ (*Sorbus alnifolia*), ケヤマハンノキ (*Alnus hirsuta*) などで, 天然生の針葉樹はトドマツ (*Abies sachalinensis*) が主体で, わずかにエゾマツ (*Picea jezoensis*) が混生している。もともこの演習林には, 木本植物 104 種と草本植物 255 種があり, 合計 82 科 359 種が認められている。おもな造林樹種は, カラマツ, トドマツ, アカエゾマツ (*Picea glehnii*) で, ストローブマツ (*Pinus strobus*), バンクスマツ (*Pinus banksiana*), ヨーロッパトウヒ (*Picea abies*) など多種類の外来樹種も植栽されている^{14),17)}。

天然生広葉樹林 (1,476 ha) のうち 478 ha が本研究の対象地域である (図-4)。この地域に用いた航空写真はコース C₁ の 6~10 とコース C₂ の 6~10 で, 1981 年 10 月に撮影されたものである。

第 4 章 人工林の蓄積推定

I 対象森林の地位による階層分け

地位の判定方法には, 材積による方法, 主林木の平均樹高による方法, 土地およびその環境因子から総合判定する方法などがあるが, 主林木の平均樹高による方法が一般的に行われる。

1976年には航空写真の濃度から地位を判定する手法が研究され、応用の可能性が開けた。そこでこの研究においてもこの方法を用い、地位を基準として階層分けを行った。

航空写真の濃度と地位との関係について、大金は次のような理論づけを行っている。すなわち「一般に単位面積当りのクロロフィルの量が多い程植物の生長が良く」、しかも「これ(クロロフィル—筆者)の含量の多少は写真の濃淡となって表われる」ことにより、同一樹種であれば、生長の良い林木ほどクロロフィルの量が多い。そのため地位の良い所にある林木についてみると、地位の悪い所のものに比べ、その写真濃度が相対的に高くなることを明らかにした^{34),35),36),37)}。

写真濃度の測定は、デジタルカラー装置フォスダック(Phosdac)1000によって行った。大金はこの装置について、「デジタル技術とカラーTVの応用から、カラー画像解析を行うエレクトロニクス装置であり、これは各種写真フィルム(白黒・赤外・カラー・その他)の濃淡を電気信号の強さにおきかえ、これの対数変換から12段階の色彩(黒・紫・マゼンタ・赤・茶・黄・オリーブ・暗緑・明緑・明青・暗青・白)に再現するものである。」と述べている。この装置の外形は写真-4に示してある³⁴⁾。



写真-4 デジタルカラー装置フォスダック 1000
Photo 4. Digital color equipment (Phosdac 1000).

第1章で述べた方法により、対象地域のデジタルカラー写真を作成し、これにより概略の地位区分を行った。対象地を含むデジタルカラー写真を写真-5に示す。これをみると、濃度の高いものから低いものへ、紫と赤の2色に分解できる。そして紫の部分の地位上、赤の部分を地位下と階層分けした。

デジタルカラー写真の分析の結果、全面積 16.42 haのうち、地位上の林地は 7.02 ha、地位下の林地は 9.40 haであった。航空写真上で階層分けされたそれぞれの地位をもつ林分の地上調査を行った。標準地は図-5に示してあるが、地位上 8箇所、地位下 8箇所である。



写真-5 人工林対象地域のデジタルカラー写真

Photo 5. Digital color photograph of investigated area.

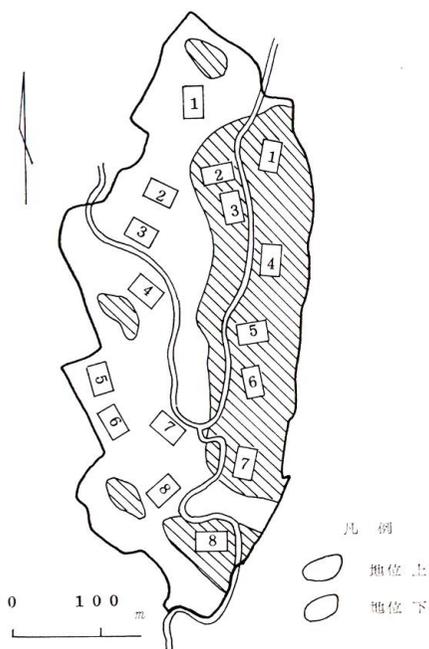


図-5 デジタルカラー写真による地位判別

Fig. 5. Site quality of the investigated forest by digital color photograph.

表-4, 5は地位上と地位下のそれぞれの林地に設定した標準地における調査成績をまとめたものである。これらの表をみると明らかなように、地位上の標準地における上層木の樹高が地位下のそれよりも高くなっている。

写真-6, 7に地位上の林相, 写真-8, 9に地位下の林相を示す。

表-4 標準地調査成績 (地位上)

Table 4. Results of the sample plots (good site quality)

Plot	本数 (N/0.1 ha)	材積 (m ³ /0.1 ha)	主林木 (m)	優勢木 (m)
1	70	24.01	17.46	17.71
2	69	25.02	17.58	17.58
3	110	25.51	16.43	16.72
4	98	30.17	16.61	16.70
5	89	28.87	17.15	18.24
6	82	23.10	16.96	17.66
7	85	26.53	16.63	17.50
8	69	23.17	16.60	17.40

表-5 標準地調査成績 (地位下)

Table 5. Results of the sample plots (bad site quality)

Plot	本数 (N/0.1 ha)	材積 (m ³ /0.1 ha)	主林木 (m)	優勢木 (m)
1	117	25.51	15.14	15.35
2	97	23.87	15.01	15.11
3	86	21.68	15.38	15.50
4	97	25.57	15.26	15.40
5	85	24.76	15.76	16.02
6	82	20.50	15.22	15.74
7	97	23.62	15.34	15.47
8	92	22.24	14.69	14.93



写真—6 地位上の林相

Photo 6. *Pinus densiflora* stand (good site quality).



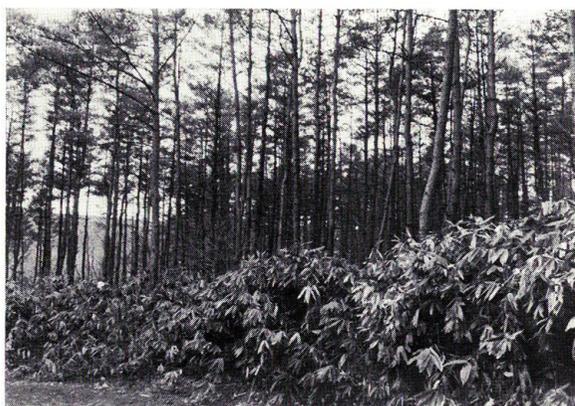
写真—7 地位上の林相

Photo 7. *Pinus densiflora* stand (good site quality).



写真—8 地位下の林相

Photo 8. *Pinus densiflora* stand (bad site quality).



写真—9 地位下の林相

Photo 9. *Pinus densiflora* stand (bad site quality).

II 適用収穫表の決定

航空写真による人工林の蓄積推定においては、その精度を高めるため、一般的に階層分けを行うが、その基準として林齢が用いられていた。しかし、これと蓄積との相関はかならずしも高くなく、その基準として十分とはいえない。

そこで、本研究では地位を基準として、これと収穫表を併用して蓄積の推定を試みた。収穫表は、青森県のアカマツ林のものが存在しないため、調査箇所がこれに近い岩手地方のアカマツ林林分収穫表(1947年)の使用を検討したが、調査地の森林現況に適合しなかった。そこで、ここでは同じ東北地方の「盤城地方アカマツ林林分収穫表」(林野庁指導部研究普及課作製)を使用した。この収穫表は、表-6, 7, 8のとおりである。これは1952年の調製によるもので、地位は1~3等に区分され、各因子の項目は林齢10年から100年までのものが表示されている。

この収穫表のうち、標準地における林齢と樹高の関係を検討し、地位上の林分には地位2等(表-7)の値を、また地位下の林分については地位2等(表-7)と地位3等(表-8)の平均値を適用した。

III 対象森林の立木度の決定

第1章で述べた方法により、標準地調査のデータから標準地ごとに収穫表と対照し、立木度を計算した。立木度は、ある林分の実際材積の法正材積(期待材積または正常材積で、普通は収穫表の数値をとる)に対する比率をさすと定義されているが、ときには実際の生立木本数の法正(基準)本数に対する比率をさしている人もある^{18),19),24),33)}。

しかしこの研究では、標準地材積に対する該当地位収穫表の材積の比率を用いた。各標準地の立木度の結果は表-9, 10のとおりである。

航空写真を用いて森林蓄積を推定するとき、従来世界中の多くの研究者の間で行われていたのは、2つの独立変数(平均樹高と樹冠疎密度)を利用したものである。一方この研究では、

表-6 いわき地方あかまつ林分収獲表 地位1等

Table 6. Normal yield table of *Pinus densiflora* stand in Iwaki District (site class 1)

林 齢	主 林 木								副 林 木						主 副 林 木 合 計										
	平 均			陌 当					平均 胸高直径 (cm)	陌 当					陌 当										
	胸 高 直径 (cm)	樹 高 (m)	同 範 囲 (m)	本 数	胸 断 面 積 (m ²)	幹 材 積 (m ³)	幹 成 材 積 長 連 年 量 (m ³)	幹 成 材 積 長 平 均 量 (m ³)		本 数	総 計 する 比 率 に 対 す る 林 木 積 に 対 す る 比 率 (%)	幹 材 積 (m ³)	総 計 する 比 率 に 対 す る 比 率 (%)	副 累 計 する 比 率 に 対 す る 比 率 (%)	主 対 する 比 率 に 対 す る 比 率 (%)	本 数	幹 材 積 (m ³)	幹 成 材 積 長 連 年 量 (m ³)	幹 成 材 積 長 平 均 量 (m ³)	総 収 獲 量 (m ³)	幹 材 積 長 連 年 量 (m ³)	幹 成 材 積 長 平 均 量 (m ³)	副 計 する 比 率 に 対 す る 比 率 (%)		
10	4.9	5.2	4.8-5.7	5200	11.5	36.5		3.65	4.0						5200	36.5		3.65	36.5						
15	8.4	8.7	7.9-9.4	2800	16.8	86.5	10.00	5.77	6.6	2400	45.2	26.4	23.4	26.4	30.5	5200	112.9	15.28	7.53	112.9	7.53	23.4			
20	12.1	11.5	10.4-12.5	1702	21.5	138.5	10.40	6.93	9.2	1098	39.2	34.0	19.7	60.4	43.6	2800	172.5	17.20	8.63	198.9	9.95	30.4			
25	15.8	13.9	12.7-15.2	1219	25.6	191.5	10.60	7.66	11.7	483	28.4	30.4	13.7	90.8	47.4	1702	221.9	16.68	8.88	282.3	11.29	32.2			
30	19.4	15.9	14.4-17.3	945	29.3	242.0	10.10	8.07	14.1	274	22.5	29.0	10.7	119.8	49.5	1219	271.0	15.90	9.03	361.8	12.06	33.1			
35	22.7	17.4	15.9-19.0	765	32.4	285.0	8.80	8.17	16.5	180	19.0	28.8	9.1	148.6	52.0	945	314.8	14.56	8.99	434.6	12.42	34.2			
40	25.7	18.8	17.1-20.5	644	34.9	324.5	7.70	8.11	18.8	121	15.8	27.1	7.7	175.7	54.1	765	351.6	13.12	8.79	500.2	12.51	35.1			
45	28.5	19.9	18.1-21.7	560	37.1	358.5	6.80	7.97	21.0	84	13.0	25.0	6.5	200.7	55.0	644	383.5	11.80	8.52	559.2	12.43	35.9			
50	31.1	20.7	18.9-22.6	495	39.0	388.0	5.90	7.76	22.9	64	11.4	24.4	5.9	225.1	58.0	560	412.4	10.78	8.25	613.1	12.25	36.7			
55	33.5	21.6	19.6-23.5	446	40.7	414.0	5.20	7.53	25.0	50	10.1	23.7	5.4	248.8	60.1	495	437.7	9.95	7.95	662.8	12.05	37.5			
60	35.8	22.2	20.2-24.2	405	42.2	437.5	4.70	7.29	27.0	41	9.2	23.5	5.1	272.3	62.2	446	461.0	9.00	7.68	709.8	11.83	38.4			
65	38.0	22.7	20.6-24.7	371	43.5	459.0	4.30	7.06	28.9	34	8.4	23.3	4.8	295.6	64.4	405	482.3	8.95	7.42	754.6	11.61	39.2			
70	40.0	23.2	21.1-25.3	344	44.7	479.0	4.00	6.84	30.8	27	7.3	21.7	4.3	317.3	66.2	371	500.7	8.34	7.15	796.3	11.38	39.8			
75	41.9	23.5	21.4-25.7	322	45.8	496.5	3.50	6.62	32.6	22	6.4	20.4	3.9	337.7	68.0	344	516.8	7.58	6.89	834.2	11.12	40.5			
80	43.6	24.0	21.9-26.2	304	46.8	512.5	3.20	6.41	34.3	18	5.6	19.1	3.6	356.8	69.6	322	531.6	7.02	6.65	859.3	10.88	41.0			
85	45.1	24.4	22.2-26.6	289	47.7	527.5	3.00	6.21	35.9	15	4.9	18.0	3.3	374.8	71.1	304	545.5	6.60	6.42	902.3	10.62	41.5			
90	46.5	24.6	22.4-26.9	276	48.5	541.0	2.70	6.01	37.4	13	4.5	17.6	3.2	392.4	72.5	289	558.6	6.22	6.21	933.4	10.37	42.0			
95	47.8	24.9	22.6-27.1	265	49.2	553.0	2.40	5.82	38.8	11	4.0	16.6	2.9	409.0	74.0	275	569.6	5.72	6.00	932.0	10.13	42.5			
100	49.0	25.1	22.9-27.4	255	49.8	564.0	2.20	5.64	40.1	10	3.8	16.7	2.9	425.7	75.5	265	580.7	5.54	5.81	989.7	9.90	43.0			

注) 林野庁指導部研究普及課: いわき地方あかまつ林分収獲表調製
説明書 74 pp 1952による。

表-7 いわき地方あかまつ林分収穫表 地位2等

Table 7. Normal yield table of *Pinus densiflora* stand in Iwaki District (site class 2)

林 齢	主 林 木								副 林 木						主 副 林 木 合 計							
	平 均			陌 当					平均 胸高直径 (cm)	陌 当					陌 当							
	胸 高 直径 (cm)	樹 高 (m)	同 範 囲 (m)	本 数	胸 断 面 積 (m ²)	幹 材 積 (m ³)	幹 材 積 連 年 量 (m ³)	幹 材 積 平 均 量 (m ³)		本 数	総 計 率 に 対 す る 比 率 (%)	幹 材 積 (m ³)	総 計 率 に 対 す る 比 率 (%)	果 木 幹 材 積 計 算 (m ³)	主 幹 材 積 に 対 す る 比 率 (%)	本 数	幹 材 積 (m ³)	幹 材 積 連 年 量 (m ³)	幹 材 積 平 均 量 (m ³)	総 収 穫 量 (m ³)	幹 材 積 平 均 量 (m ³)	副 計 率 に 対 す る 比 率 (%)
10	4.4	4.3	3.8-4.7	5700	10.1	27.0		2.70	3.8						5700	27.0		2.70	27.0			
15	7.4	7.1	6.3-7.8	3040	14.6	61.0	6.80	4.07	6.0	2650	46.7	23.9	28.2	23.9	39.2	5700	84.9	11.58	5.66	84.9	5.66	28.2
20	10.6	9.4	8.4-10.3	1905	18.7	99.0	7.60	4.95	8.2	1135	37.3	25.0	20.2	48.9	49.4	3040	124.0	12.60	6.20	147.9	7.40	33.1
25	13.8	11.4	10.1-12.6	1402	22.4	137.5	7.70	5.50	10.3	503	25.4	20.6	13.0	69.5	50.5	1905	158.1	11.82	6.32	207.0	8.28	33.6
30	16.8	13.0	11.6-14.3	1096	25.7	174.0	7.50	5.80	12.3	305	21.8	20.5	10.5	90.0	51.7	1402	194.5	11.40	6.48	264.0	8.80	34.1
35	19.6	14.5	12.7-15.8	892	28.4	207.0	6.50	5.91	14.3	204	18.6	20.2	8.9	110.2	53.2	1095	227.2	10.64	6.49	317.2	9.05	34.7
40	22.2	15.4	13.7-17.0	754	30.7	237.5	6.10	5.94	16.2	138	15.5	18.8	7.3	129.0	54.3	892	256.3	9.86	6.41	366.5	9.16	35.2
45	24.6	16.3	14.5-18.0	656	32.7	265.0	5.50	5.89	18.0	98	13.0	17.5	6.2	146.5	55.3	754	282.5	9.00	6.28	411.5	9.14	35.6
50	26.9	17.0	15.1-18.8	581	34.5	289.0	4.80	5.78	19.8	75	11.4	17.0	5.6	163.5	56.6	655	306.0	8.20	6.12	452.5	9.05	36.1
55	29.0	17.7	15.8-19.5	523	36.1	310.0	4.20	5.64	21.5	58	10.0	16.2	5.0	179.7	58.0	581	326.2	7.44	5.93	489.7	8.90	35.7
60	31.0	18.2	16.2-20.1	476	37.5	329.0	3.80	5.48	23.1	47	9.0	15.8	4.6	195.5	59.4	523	344.8	6.95	5.75	524.5	8.74	37.3
65	32.9	18.6	16.6-20.5	438	38.8	346.5	3.50	5.33	24.7	38	8.0	15.0	4.1	210.5	60.8	476	361.5	6.50	5.56	557.0	8.57	37.8
70	34.7	19.0	16.9-21.0	407	40.0	362.5	3.20	5.18	26.2	31	7.1	14.2	3.8	224.7	62.0	433	376.7	6.04	5.38	587.2	8.39	38.3
75	36.3	19.3	17.2-21.3	381	41.1	377.5	3.00	5.03	27.6	26	6.4	13.7	3.5	238.4	63.2	407	391.2	5.74	5.22	615.9	8.21	38.7
80	37.8	19.7	17.5-21.8	360	42.1	391.0	2.70	4.89	29.0	21	5.5	12.5	3.1	250.9	64.2	381	403.5	5.20	5.04	641.9	8.02	39.1
85	39.2	20.0	17.8-22.1	342	43.0	403.5	2.50	4.75	30.3	18	5.0	12.0	2.9	262.9	65.2	360	415.5	4.90	4.89	666.4	7.84	39.5
90	40.5	20.2	18.0-22.3	327	43.8	415.0	2.30	4.61	31.5	15	4.4	11.0	2.6	273.9	66.0	342	426.0	4.50	4.73	688.9	7.65	39.8
95	41.7	20.4	18.2-22.5	314	44.5	425.5	2.10	4.48	32.6	13	4.0	10.6	2.4	284.5	66.9	327	436.1	4.22	4.59	710.0	7.47	40.1
100	42.8	20.6	18.3-22.8	302	45.1	435.0	1.90	4.35	33.7	12	3.8	10.7	2.4	295.2	67.9	314	445.7	4.04	4.46	730.2	7.30	40.4

注) 林野庁指導部研究普及課：いわき地方あかまつ林分収穫表調製
説明書 75 pp 1952による。

航空写真による森林蓄積の推定に関する研究 (ツトメツツ)

表—8 いわき地方あかまつ林分収穫表 地位3等
 Table 8. Normal yield table of *Pinus densiflora* stand in Iwaki District (site class 3)

林 齡	主 林 木								副 林 木							主 副 林 木 合 計						
	平 均			陌 当					平均胸高直径 (cm)	陌 当						陌 当						
	胸高直径 (cm)	樹 高 (m)	同 範 囲 (m)	本 数	胸断面積 (m ²)	幹材積 (m ³)	幹成材積 (m ³)	幹成材積 長平均量 (m ³)		本 数	総する比率 に對 (%)	幹材積 (m ³)	総する比率 に對 (%)	副林木幹材積 (m ³)	主林木幹材積 に對 (%)	本 数	幹材積 (m ³)	幹成材積 長平均量 (m ³)	幹成材積 長平均量 (m ³)	総収穫量 (m ³)	幹材積 平均量 (m ³)	副林木幹材積 に對する比率 (%)
10	3.8	3.4	2.9-3.7	6300	8.4	19.0		1.90	3.5						6300	19.0		1.90	19.0			
15	6.4	5.5	4.8-6.2	3380	12.3	38.0	3.80	2.53	5.4	2920	46.2	20.4	34.9	20.4	53.7	6300	58.4	7.88	3.89	58.4	3.89	34.9
20	9.1	7.3	6.3-8.3	2165	15.8	64.5	5.30	3.23	7.2	1215	35.9	18.2	22.0	38.6	59.8	3380	82.7	8.94	4.14	103.1	5.16	37.4
25	11.7	8.9	7.6-10.0	1630	19.0	91.5	5.40	3.66	8.8	535	24.7	14.4	13.6	53.0	57.9	2165	105.9	8.28	4.24	144.5	5.78	36.7
30	14.2	10.1	8.7-11.5	1290	21.9	116.5	5.00	3.88	10.5	340	20.9	14.3	10.9	67.3	57.8	1630	130.8	7.86	4.36	183.8	6.13	36.6
35	16.6	11.2	9.6-12.6	1055	24.3	139.5	4.60	3.99	12.1	235	18.2	14.3	9.3	81.6	58.5	1290	153.8	7.46	4.39	221.1	6.32	36.9
40	18.8	12.0	10.3-13.6	893	26.4	160.5	4.20	4.01	13.7	162	15.4	13.4	7.7	95.0	59.2	1055	173.9	6.88	4.35	255.5	6.39	37.2
45	20.9	12.7	10.9-14.4	778	28.3	180.0	3.90	4.00	15.2	115	12.9	12.4	6.4	107.4	59.7	893	192.4	6.38	4.28	287.4	6.39	37.4
50	22.8	13.3	11.4-15.0	692	30.0	198.0	3.60	3.96	16.7	86	11.1	11.7	5.6	119.1	60.2	778	209.7	5.94	4.19	317.1	6.34	37.6
55	24.6	13.8	11.9-15.7	626	31.5	214.5	3.30	3.90	18.1	66	9.5	11.0	4.9	130.1	60.7	692	225.5	5.50	4.10	344.6	6.27	37.8
60	25.3	14.2	12.2-16.1	573	32.9	230.0	3.10	3.83	19.5	53	8.5	10.6	4.4	140.7	61.2	626	240.6	5.22	4.01	370.7	6.18	38.0
65	27.9	14.5	12.5-16.5	530	34.2	244.5	2.90	3.76	20.8	43	7.5	10.1	4.0	150.8	61.7	573	254.6	4.92	3.92	395.3	6.08	38.1
70	29.4	14.8	12.7-16.8	495	35.4	258.0	2.70	3.69	22.1	35	6.6	9.5	3.6	160.3	62.1	530	257.5	4.60	3.82	418.3	5.98	38.3
75	30.8	15.1	12.9-17.1	465	36.5	270.5	2.50	3.61	23.3	30	6.1	9.3	3.3	169.6	62.7	495	279.8	4.36	3.73	440.1	5.87	38.5
80	32.1	15.4	13.2-17.4	440	37.5	282.0	2.30	3.53	24.4	25	5.4	8.8	3.0	178.4	63.3	465	290.8	4.06	3.64	450.4	5.76	38.7
85	33.3	15.6	13.4-17.7	420	38.4	292.5	2.10	3.44	25.5	20	4.5	7.9	2.6	185.3	63.7	440	300.4	3.68	3.53	478.8	5.63	38.9
90	34.4	15.8	13.5-17.9	403	39.2	302.5	1.90	3.36	26.5	17	4.0	7.4	2.4	193.7	64.0	420	309.9	3.48	3.44	496.2	5.51	39.0
95	35.4	15.9	13.7-18.1	389	39.9	310.5	1.70	3.27	27.5	14	3.5	6.7	2.1	200.4	64.5	403	317.2	2.94	3.34	510.9	5.38	39.2
100	36.3	16.1	13.8-18.2	376	40.5	318.5	1.60	3.19	28.4	13	3.3	6.8	2.1	207.2	65.1	389	325.3	2.96	3.25	525.7	5.26	39.4

注) 林野庁指導部研究普及課: いわき地方あかまつ林分収穫表調製
 説明書 76 pp 1952による。

表-9 標準地の立木度と航空写真により推定した樹冠疎密度 (地位上)

Table 9. Stand density of sample plots and crown density by aerial photographs (good site quality)

Plot	立木度 (%)	樹冠疎密度 (%)
1	74	80
2	78	84
3	78	86
4	92	92
5	85	87
6	71	78
7	81	86
8	71	79

表-10 標準地の立木度と航空写真により推定した樹冠疎密度 (地位下)

Table 10. Stand density of sample plots and crown density by aerial photographs (bad site quality)

Plot	立木度 (%)	樹冠疎密度 (%)
1	91	90
2	87	80
3	79	78
4	93	90
5	90	85
6	74	70
7	86	80
8	81	82

表-11 各回帰式の定数と相関係数 (地位上)

Table 11. Coefficient regression and coefficient correlation of each regression equation (good site quality)

回帰式	a	b	r
1. $Y=a+bX$	-0.446	1.468	0.97*
2. $Y=a+b \text{Log } X$	1.231	1.453	0.95*
3. $Y=aX^b$	1.216	1.634	0.93*

注) * は有意水準 5% レベル

表-12 各回帰式の定数と相関係数 (地位下)

Table 12. Coefficient regression and coefficient correlation of each regression equation (bad site quality)

回帰式	a	b	r
1. $Y=a+bX$	0.107	0.909	0.91*
2. $Y=a+b \text{Log } X$	1.112	0.813	0.91*
3. $Y=aX^b$	1.214	0.778	0.91*

注) * は有意水準 5% レベル

樹冠疎密度のみを独立変数として利用する。

次に表-11, 12は, 各標準地から求めた X (航空写真上で求めた樹冠疎密度), Y (立木度) の値を3種類の回帰式に代入し, 常数の b, r を地位上, 地位下の林地別に求めたものである。これらの表をみると, 地位上では $Y = -0.446 + 1.468 X$ の回帰式の相関係数 r がもっとも高く, 地位下ではいずれの回帰式も同じ r の値を示した。よってここでは $Y = 0.107 + 0.909 X$ の回帰式を採用することにした。

IV 森林蓄積の推定

航空写真より判読した樹冠疎密度から地位上, 地位下それぞれの式 ($Y = -0.446 + 1.468 X$ と $Y = 0.107 + 0.909 X$) を用いて立木度を推定し, これを該当収穫表材積に乘じ, プロットごとの ha 当りの材積を算出した。

図-6, 7は, 航空写真から以上のようにして求めた材積と実測材積との関係を示したものであり, この関係式は $Y = a + bX$ である。ここで Y は実測材積, X は航空写真から求めた材積であり, 破線は信頼度 95% Level の範囲である。したがって航空写真から求めた材積と実測材積とは 5% の危険率ではほぼ等しいと認めることができる。また航空写真による材積と地上調査による材積の誤差率は, 表-13, 表-14 に示すとおりである。この表をみると, 地位上・下とも誤差率はそれぞれ 0.4% となっている。このように精度が高いのは樹冠疎密度の判読に比較的個人差が少いためである。したがって立木度と樹冠疎密度との関係は, 地位上で $Y = -0.446 + 1.468 X$, 地位下で $Y = 0.107 + 0.909 X$ の式が適用可能である。

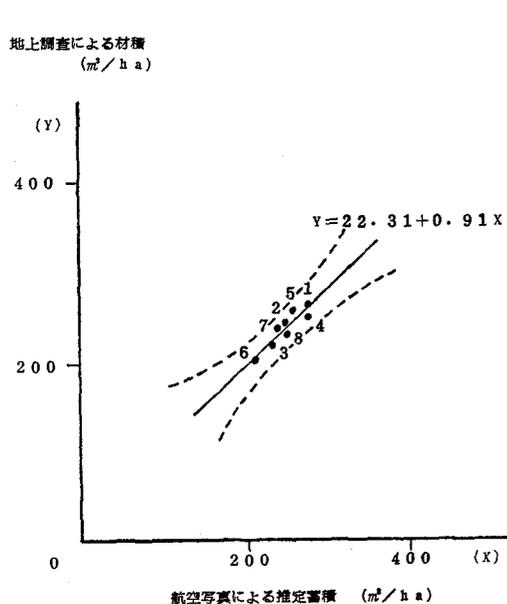


図-6 航空写真による推定蓄積と地上調査による材積との関係 (地位上)

Fig. 6. The relation between estimated volume and surveyed volume (Good site quality).

(---) は 95% 信頼度限界

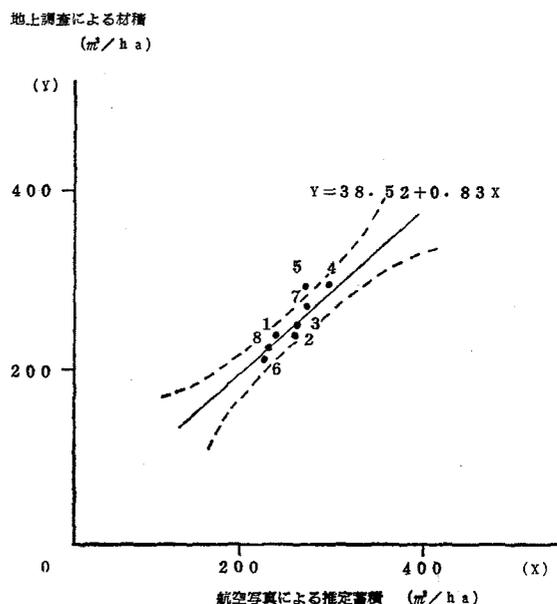


図-7 航空写真による推定蓄積と地上調査による材積との関係 (地位下)

Fig. 7. The relation between estimated volume and surveyed volume (Bad site quality).

(---) は 95% 信頼度限界

森林全体の蓄積は, 第1章で述べた比例抽出の方法により, 航空写真上で各層ごとにプロットを Random に設定して推定した。設定した地位上, 地位下の抽出プロット数は, 比例抽出法によって次のように求めた。すなわち,

表-13 航空写真による推定蓄積の実測材積に対する誤差 (地位上)
 Table 13. Error of volume estimated by aerial photograph
 (good site quality)

Plot	地上調査による実測材積 (m ³ /ha)	航空写真による推定蓄積 (m ³ /ha)	誤 差 (m ³ /ha)
1	240.10	237.46	-2.64
2	250.02	256.60	6.58
3	255.10	266.17	11.07
4	301.70	294.89	-6.81
5	288.70	270.96	-17.74
6	231.00	227.89	-3.11
7	265.30	266.17	0.87
8	231.70	232.67	0.97
平 均	257.95	256.60	—

注) 誤差率=0.4%

表-14 航空写真による推定蓄積の実測材積に対する誤差 (地位下)
 Table 14. Error of volume estimated by aerial photograph
 (bad site quality)

Plot	地上調査による実測材積 (m ³ /ha)	航空写真による推定蓄積 (m ³ /ha)	誤 差 (m ³ /ha)
1	252.10	255.33	3.23
2	238.70	230.24	-8.46
3	216.80	225.22	-8.42
4	255.70	255.33	-0.37
5	247.60	242.78	-4.82
6	205.00	205.15	0.15
7	236.20	230.24	-5.96
8	222.40	235.26	12.86
平 均	234.31	234.94	—

注) 誤差率=0.4%

$$\frac{1}{164^2} (k-1) \left\{ (70 \times 509.98) + (94 \times 306.57) \right\} = (0.05)^2$$

$$\frac{1}{246^2} (k-1) \left\{ (70 \times 509.98) + (94 \times 306.57) \right\} = (0.05)^2$$

上式の結果、 k は64となった。

次に上式で求めた k を用い、各層ごとの抽出プロット数 n_i を次式で算出した。

$$n_{\text{上}} = \frac{1}{64} (70) = 1.09$$

$$n_{\text{下}} = \frac{1}{64} (94) = 1.47$$

上式の結果、必要なプロット数は、地位上・下ともそれぞれ2個となった。なお NEYMAN

表-15 抽出プロットの推定の結果(地位上)

Table 15. Estimated volume by aerial photographs (good site quality)

写真上で抽出したプロット	推定樹冠疎密度	立木度(1)	収穫表蓄積(2) (m ³ /ha)	推定蓄積(1×2) (m ³ /ha)
1	0.85	0.80	326	261
2	0.88	0.85	326	277
3	0.82	0.76	326	248
4	0.92	0.90	326	293

表-16 抽出プロットの推定の結果(地位下)

Table 16. Estimated volume by aerial photographs (bad site quality)

写真上で抽出したプロット	推定樹冠疎密度	立木度(1)	収穫表蓄積(2) (m ³ /ha)	推定蓄積(1×2) (m ³ /ha)
1	0.81	0.83	276	229
2	0.77	0.81	276	224
3	0.86	0.89	276	246
4	0.76	0.80	276	221

抽出法の結果もそれぞれ2個となったが、この研究では、安全をみて、地位上・下ともそれぞれ4個ずつ設定することにした。

写真上でこの4個のプロットの樹冠疎密度を判読し、抽出プロットの材積を計算した。その結果を表-15, 16に示す。

地位上のプロット材積(m³)をXとすると、 $\sum X=1079$, $\bar{X}=269.75$, $\sum X^2=292203$, $S_x^2=\sum X^2-\frac{(\sum X)^2}{n}=1142.75$, 分散 $S^2=\frac{S_x^2}{n-1}=380.92$, 平均値の分散 $S_{\bar{x}}^2=\frac{S^2}{n}=\frac{198.92}{4}=49.73$ であるから $S_{\bar{x}}=7.06$ となった。

危険率5%でのtの値は $t=1.96$ であるから、地位上のha当り平均材積は95%の信頼度をもって $269.75 \pm (1.96 \times 7.06) = 269.75 \pm 13.84$ m³ であることがわかった。地位上の林分(7.02ha)の蓄積は、 $7.02(269.75 \pm 13.84)$ m³, すなわち 1893.65 ± 134.29 m³ の間にあることが推定された。

地位下では $\sum X=920$, $\bar{X}=230$, $\sum X^2=211974$, $S_x^2=374$, $S^2=\frac{S_x^2}{n-1}=124.67$, $S_{\bar{x}}^2=\frac{S^2}{n}=\frac{124.67}{4}=31.17$ であるから $S_{\bar{x}}=5.58$, 平均材積は $230 \pm (1.96 \times 5.58) = 230 \pm 10.94$, 地位下の面積は9.40haであるから、その蓄積は $9.40(230 \pm 10.94)$ m³ = 2162.00 ± 102.84 m³ の範囲にあることが推定された。

対象林分の蓄積については、層化一段抽出の比例抽出法によって計算した。したがって標本の平均値 \bar{X}' は次の式で求められる。

$$\begin{aligned}\bar{X}' &= \sum_{i=1}^L N_i \bar{X}_i / N \\ &= \frac{(7.02 \times 270) + (9.40 \times 230)}{16.42} \\ &= \frac{4057.40}{16.42} = 247 \text{ m}^3/\text{ha}\end{aligned}$$

標本の分散 $S_{\bar{X}}^2$ は

$$\begin{aligned}S_{\bar{X}}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum N_i^2 \frac{N_i - n_i}{n_i - 1} \cdot \frac{S_i^2}{n_i} \\ &= \frac{1}{164^2} \left\{ \left(70^2 \times \frac{70-4}{70-1} \times \frac{19.52^2}{4} \right) + \left(94^2 \times \frac{94-4}{94-1} \times \frac{11.16^2}{4} \right) \right\} \\ &= \frac{1}{26896} (712714.5813) = 26.49 \\ S_{\bar{X}} &= 5.15\end{aligned}$$

対象林分の蓄積は

$$\begin{aligned}&= N(\bar{X}' \pm t S_{\bar{X}}) \\ &= 16.42(247 \pm 1.96 \times 5.15) \\ &= 4056 \pm 166 \text{ m}^3\end{aligned}$$

つまり、対象林分の蓄積は 95% の信頼度で 3,890~4,222 m³ の間にあることが推定された。

V 推定の精度

蓄積推定の精度は次の計算式によって求めた。

$$\text{誤差率} = K \left(\frac{S_{\bar{X}}}{\bar{X}'} \right)$$

まず次式により $S_{\bar{X}}$ を求めた。

$$S_{\bar{X}}^2 = \frac{1}{N^2} \sum N_i^2 \frac{N_i - n_i}{N_i - 1} \cdot \frac{S_i^2}{n_i}$$

ここで N は母集団の抽出単位総数 (164), N_i は i 層内の抽出単位総数 (地位上 70, 地位下 94), n_i は i 層標本内の抽出単位個数 (地位上, 下とも 4 個), S_i^2 は i 層内の分散 (地位上 19.52, 地位下 11.16), K は 1.96 である。

上式の結果, $S_{\bar{X}}^2 = 26.50$, $S_{\bar{X}} = 5.15$ となった。次に上式で求めた $S_{\bar{X}}$ を用い推定誤差率を算出した。すなわち

$$\begin{aligned}\text{誤差率は } K \left(\frac{S_{\bar{X}}}{\bar{X}'} \right) \\ &= 1.96 \left(\frac{5.15}{247} \right) \times 100 \\ &= 4.09\%\end{aligned}$$

と求められた。

第5章 天然林の蓄積推定

I 林相による階層分け

人工林では、地位を基準として階層区分を行うのに対し、天然林では、カラー写真により林相を基準として OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH の3階層に区分した。

カラー写真は、天然色 (Real Color or Natural Color) 写真と、天然の色ではない偽似カラー (False Color) 写真がある^{2),3),11),12)}。

天然色写真にはパנקロマティック・カラーフィルム (Panchromatic Color Film) が、フォールス・カラー写真には赤外線カラーフィルムが使われる^{21),36),47)}。

天然色写真は普通の判読に使われるが、最近環境調査の重要性がさげられるようになり、フォールス・カラー写真の利用が飛躍的に伸びている。

白黒写真では、すべての地表状況が、白から黒までの灰色の階調であらわされているのに対し、リアルカラー (天然色) 写真では、色相とその明度、彩度によって表現され、自然の色そのままに写しだされているため、事物の識別能力が、白黒写真に比べはるかに大きくなる。このため、林相や果樹園など植生関係の判読、無植生地域の土壌の判読などに、とくに大きな効果を発揮する^{39),48),49)}。

林業関係では、これまでにカラー写真を用いて、林相、樹種、浸食型、森林の健全性の判読等について、多数の研究が行われてきた。しかし林相判読の場合は、針葉樹林、広葉樹林、混交林といった階層分けの研究が多かった。ところが、カラー写真を用いた森林蓄積の推定はまったく行われていなかった^{45),46),52)}。

そこで、この研究では、カラー写真を用い、同一林相内の林分構造を基準として OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH に区分し、蓄積の推定を試みた。

この研究の対象地を含むカラー写真を、写真-10に示す。これをみると、Texture (肌目) は、coarse (粗)、coarse と fine (密) の中間、fine の3種の肌目に分解できる。そして coarse texture の部分が OLD GROWTH, coarse と fine の中間の texture が MIDDLE GROWTH, fine texture が YOUNG GROWTH に階層分けされる。

カラー写真判読の分析の結果、全面積 478 ha のうち、OLD GROWTH の林地は 290 ha, MIDDLE GROWTH の林地は 105 ha, YOUNG GROWTH の林地は 83 ha であった。このような階層分けは、白黒写真を用いるよりも、カラー写真を用いた方が、簡単に行うことができる。

II 森林蓄積の推定

カラー写真上で階層分けされたそれぞれの林相をもつ林分の地上調査を行った。このプロットの間積は $40\text{ m} \times 40\text{ m} = 0.16\text{ ha}$ で、OLD GROWTH 8個、MIDDLE GROWTH 6個、

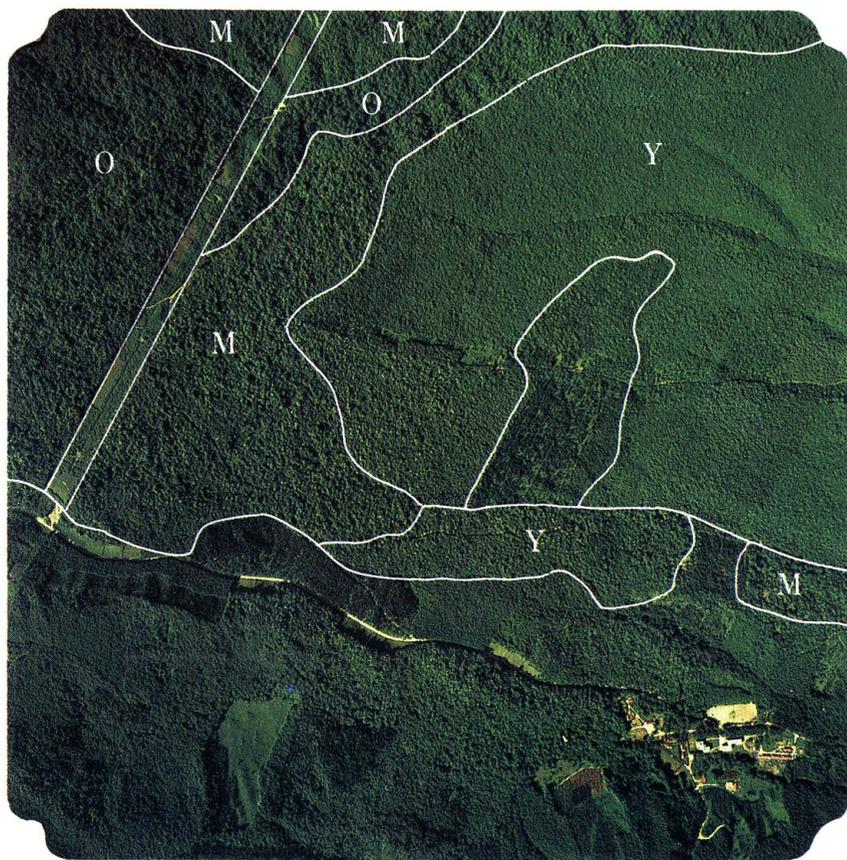


写真-10 調査対象地域のカラー写真 (コース C₂ の 7)

Photo 10. Real color photograph of investigated area (natural forest).

注) O: OLD GROWTH, M: MIDDLE GROWTH, Y: YOUNG GROWTH.

YOUNG GROWTH 5 個をそれぞれ設定した。

表-17 は, OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH のそれぞれの林地に設定した標準地における調査材積と, 航空写真上で判読した因子である。また, OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH の林相を, それぞれ写真-11, 12, 13, 14, 15, 16 に示す。

次に航空写真上からの判読資料 (平均樹高, 平均可視樹冠直径) と実測材積との関係を求めた。この関係式は,

$$Y = a + b \bar{H} + c \sqrt{\text{VCD}}$$

$$Y = a + c \sqrt{\text{VCD}}$$

ここで

$$Y = \text{実測材積 (m}^3/\text{ha)}$$

表-17 天然林における各プロットの実測材積と航空写真による判読結果
Table 17. The results of volume estimated from ground sample plots and height, visible crown diameter estimated by aerial photographs

階層分け (面積)	Plot	実測材積 (Y) (m ³ /ha)	航空写真による 樹高 (H) (m)	航空写真による可視 樹冠直径 (VCD) (m)
OLD GROWTH (290 ha)	1	167.90	19.8	6.9
	12	179.60	23.7	7.9
	13	108.50	18.2	5.9
	14	137.56	20.4	6.1
	15	150.31	21.9	6.5
	16	133.00	19.7	6.2
	17	147.37	23.2	7.1
	18	191.94	24.1	8.0
MIDDLE GROWTH (105 ha)	2	88.12	13.6	4.8
	3	127.56	17.7	5.1
	6	68.50	13.9	4.9
	7	85.19	13.2	5.0
	8	132.12	16.8	5.4
	19	68.31	13.7	4.5
YOUNG GROWTH (83 ha)	4	58.94	12.5	4.0
	5	76.62	12.7	4.7
	9	32.12	12.6	3.2
	10	65.06	13.5	3.8
	11	48.93	12.9	3.6

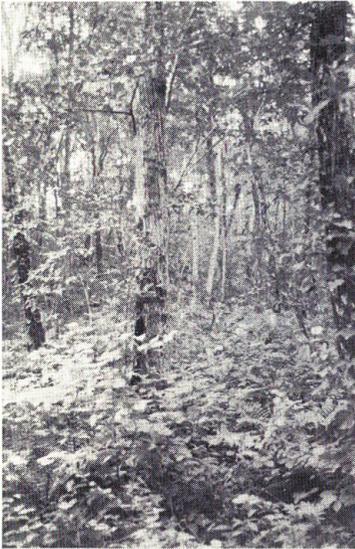
注1) 対象森林面積: 478 ha

注2) プロット面積: 40 m×40 m



写真-11 OLD GROWTH の林相

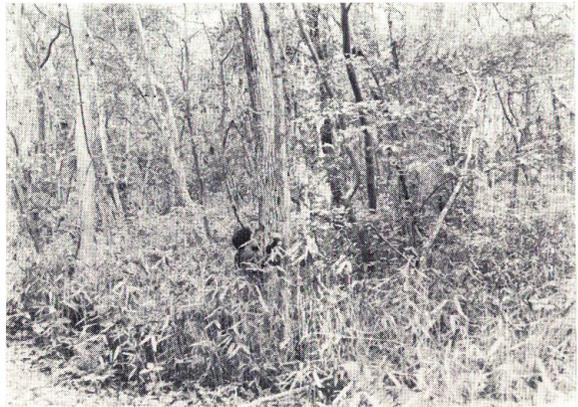
Photo 11. Old growth stand.



写真—12 OLD GROWTH の林相
Photo 12. Old growth stand.



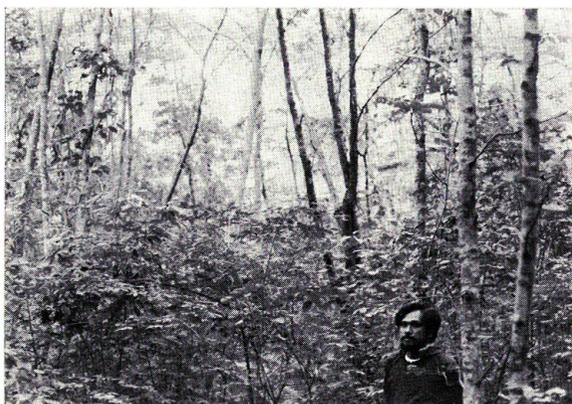
写真—13 MIDDLE GROWTH の林相
Photo 13. Middle growth stand.



写真—14 MIDDLE GROWTH の林相
Photo 14. Middle growth stand.



写真—15 YOUNG GROWTH の林相
Photo 15. Young growth stand.



写真—16 YOUNG GROWTH の林相

Photo 16. Young growth stand.

表—18 Matrix による計算結果 (林分全体)

Table 18. The calculation of regression equation using inverse matrix in natural forest

Item		A Matrix		G Matrix Y	Check
		X 1	X 2		
1	X 1	320.01	100.26	3361.14	3781.41
	X 2	100.26	35.45	1143.95	1279.66
2	A1 J	320.01	100.26	3361.14	3781.41
	B1 J	1	0.31	10.50	11.82
3	A2 J		4.07	90.90	94.96
	B2 J		1	22.36	23.36

注) $V = -74.27 + 3.50 \bar{H} + 22.36 \text{VCD}$, $r = 0.87$

表—19 Matrix による計算結果 (OLD GROWTH)

Table 19. The calculation of regression equation using inverse matrix in old growth stand

Item		A Matrix		G Matrix Y	Check
		X 1	X 2		
1	X 1	183.76	19.86	757.87	961.49
	X 2	19.86	4.50	139.65	164.01
2	A1 J	183.76	19.86	757.87	961.49
	B1 J	1	0.11	4.05	5.13
3	A2 J		2.40	59.32	61.71
	B2 J		1	24.77	25.77

注) $V = -45.61 + 1.42 \bar{H} + 24.77 \text{VCD}$, $r = 0.89$

表-20 Matrixによる計算結果 (MIDDLE GROWTH)

Table 20. The calculation of regression equation using inverse matrix in middle growth stand

Item		A Matrix		G Matrix Y	Check
		X 1	X 2		
1	X 1	18.43	1.96	245.83	266.22
	X 2	1.96	0.46	35.46	37.88
2	A1J	18.43	1.96	245.83	266.22
	B1J	1	0.11	13.34	14.45
3	A2J		0.24	8.42	8.66
	B2J		1	35.08	36.08

注) $V = -219.17 + 9.48 \bar{H} + 35.08 \bar{VCD}$, $r = 0.91$

表-21 Matrixによる計算結果 (YOUNG GROWTH)

Table 21. The calculation of regression equation using inverse matrix in young growth stand

Item		A Matrix		G Matrix Y	Check
		X 1	X 2		
1	X 1	0.63	-0.06	7.40	7.97
	X 2	-0.06	1.23	34.79	35.96
2	A1J	0.63	-0.06	7.40	7.97
	B1J	1	-0.10	11.71	12.61
3	A2J		1.23	35.52	36.75
	B2J		1	28.97	29.97

注) $V = -242.31 + 14.55 \bar{H} + 28.97 \bar{VCD}$, $r = 0.86$ 表-22 各林相における $Y = a + bX$ 式の定数と相関係数Table 22. Invariable numbers and correlation of regression equation ($Y = a + bX$) of each stand

林 相	a	b	r
林 分 全 体	-67.14	32.27	0.96
OLD GROWTH	-60.01	31.07	0.92
MIDDLE GROWTH	-290.87	77.94	0.93
YOUNG GROWTH	-52.66	28.24	0.93

\bar{H} = 平均樹高 (m)

\overline{VCD} = 平均樹冠直径 (m)

それぞれの式を用いて、林分全体と各階層ごとの実測材積を計算した。この関係式の計算方法は Matrix を利用した^{7),13)}。この結果は表-18, 19, 20, 21, 22 に示すとおりである。

表-23 は、階層分けしない林分全体および各階層ごとの関係式と標準誤差率をまとめたものである。この表をみると、林分全体では樹高の要素がないと精度が低下するが、階層分けをした場合には樹高の要素が含まれているので、計算上では精度が高い。

表-23 林分全体及び各階層毎の関係式と標準誤差率

Table 23. Regression equation and standart error rate of each forest stand

林 相	関 係 式	r	標準誤差率 (%)
林 分 全 体	$Y = -74.27 + 3.50 H + 22.36 \overline{VCD}$	0.87	18.12
	$Y = -67.14 + 32.27 \overline{VCD}$	0.96	17.19
OLD GROWTH	$Y = -45.61 + 1.42 H + 24.77 \overline{VCD}$	0.89	14.90
	$Y = -60.01 + 31.07 \overline{VCD}$	0.92	9.15
MIDDLE GROWTH	$Y = -219.17 + 9.48 H + 35.08 \overline{VCD}$	0.91	15.49
	$Y = -290.87 + 77.94 \overline{VCD}$	0.93	11.12
YOUNG GROWTH	$Y = -242.31 + 14.55 H + 28.97 \overline{VCD}$	0.87	15.76
	$Y = -52.66 + 28.24 \overline{VCD}$	0.93	9.81

この結果から、 $Y = -60.01 + 31.07 \overline{VCD}$ (OLD GROWTH), $Y = -290.87 + 77.94 \overline{VCD}$ (MIDDLE GROWTH), $Y = -52.66 + 28.24 \overline{VCD}$ (YOUNG GROWTH) を用いて、それぞれの林相の蓄積を推定した。

図-8, 9, 10 は、航空写真から以上のようにして求めた材積と実測材積との関係を示したものであり、この関係式は $Y = a + bX$ である。ここで Y は実測材積、 X は航空写真から求めた材積であり、破線は信頼度 95% Level の範囲である。したがって航空写真から求めた材積と実測材積とは 5% の危険率ではほぼ等しいと認めることができる。また航空写真による材積と地上調査による材積の誤差率は表-24, 25, 26 に示すとおりである。この表をみると、あきらかに誤差率は低く、樹冠直径の判読が個人差が大きいにもかかわらず、このように精度が高くなったのは、その判読について相当練習した結果であって、一般的にこうした値が常に出るとはいえないがここでは材積と樹冠直径との関係は OLD GROWTH $Y = -60.01 + 31.07 \overline{VCD}$, MIDDLE GROWTH $Y = -290.87 + 77.94 \overline{VCD}$, YOUNG GROWTH $Y = -52.66 + 28.24 \overline{VCD}$ の式を適用してみた。

森林全体の蓄積は、第1章で述べた方法により推定した。実際に設定した OLD GROWTH,

地上調査による材積
($m^3/h a$)

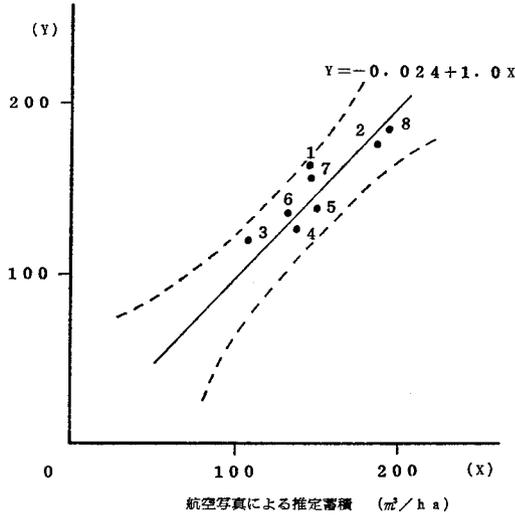


図-8 航空写真による推定蓄積と地上調査による材積との関係 (Old Growth)

Fig. 8. The relation between estimated volume and surveyed volume (Old growth).
(---) は 95% 信頼度限界

地上調査による材積
($m^3/h a$)

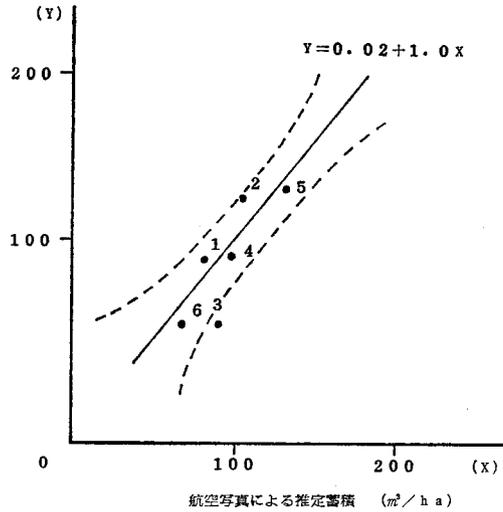


図-9 航空写真による推定蓄積と地上調査による材積との関係 (Middle Growth)

Fig. 9. The relation between estimated volume and surveyed volume (Middle growth).
(---) は 95% 信頼度限界

地上調査による材積
($m^3/h a$)

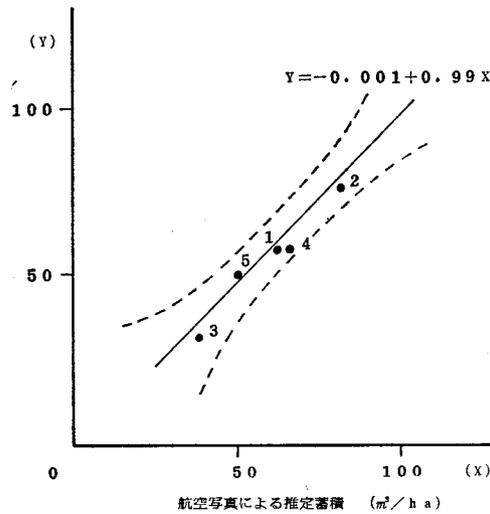


図-10 航空写真による推定蓄積と地上調査による材積との関係 (Young Growth)

Fig. 10. The relation between estimated volume and surveyed volume (Young growth).
(---) は 95% 信頼度限界

表-24 航空写真による推定蓄積の実測材積に対する誤差 (OLD GROWTH)

Table 24. Error of volume estimated by aerial photograph (old growth)

Plot	地上調査による実測材積 (m ³ /ha)	航空写真による推定蓄積 (m ³ /ha)	誤差 (m ³ /ha)
1	167.90	154.37	-13.53
2	179.60	185.43	5.83
3	108.50	123.30	14.80
4	137.56	129.52	-8.04
5	150.31	141.95	-8.36
6	133.00	132.62	0.38
7	147.37	160.59	13.22
8	191.94	188.55	-3.39
平均	152.02	152.04	

注) 誤差率=0.1%

表-25 航空写真による推定蓄積の実測材積に対する誤差 (MIDDLE GROWTH)

Table 25. Error of volume estimated by aerial photograph (middle growth)

Plot	地上調査による実測材積 (m ³ /ha)	航空写真による推定蓄積 (m ³ /ha)	誤差 (m ³ /ha)
1	88.12	83.24	-4.88
2	127.56	106.62	-20.94
3	68.50	91.03	22.53
4	85.19	98.83	13.64
5	132.12	130.01	-2.11
6	68.31	59.86	-8.45
平均	94.97	94.93	—

誤差率=0.4%

MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH の抽出プロット数の決定は、比例抽出法によって求めた。すなわち

$$\frac{1}{(2988)^2} (k-1) \left\{ (1813 \times 619.78) + (656 \times 552.85) + (519 \times 245.65) \right\} = (0.05)^2 \quad k = 142$$

次に上式で求めた k を用い、各層ごとの抽出プロット数 n_i を次式で算出した。

$$\text{OLD GROWTH } n_{o.g.} = \frac{1813}{142} = 12.7 \rightarrow 13 \text{ 個}$$

$$\text{MIDDLE GROWTH } n_{m.g.} = \frac{656}{142} = 4.7 \rightarrow 5 \text{ 個}$$

表-26 航空写真による推定蓄積の実測材積に対する誤差 (YOUNG GROWTH)

Table 26. Error of volume estimated by aerial photograph (young growth)

Plot	地上調査による実測材積 (m ³ /ha)	航空写真による推定蓄積 (m ³ /ha)	誤 差 (m ³ /ha)
1	58.94	60.30	1.36
2	76.62	80.07	3.45
3	32.12	37.71	5.59
4	65.06	54.65	-10.41
5	48.93	49.00	0.07
平 均	94.97	94.93	—

誤差率=0.4%

$$\text{YOUNG GROWTH } n_{y.g.} = \frac{519}{142} = 3.7 \rightarrow 4 \text{ 個}$$

NEYMAN 抽出法の結果は OLD GROWTH 14 個, MIDDLE GROWTH 5 個, YOUNG GROWTH 3 個となった。しかしこの研究では、層ごとの抽出プロットの片寄りを出来るだけ少くすることを考慮し、比例抽出法によって計算した個数を設定して材積を求めた。

この 13, 5, 4 個のプロットを実体視しながら、プロットの平均樹冠直径を判読し、それを前述の関係式に代入し、林相ごとに各プロットの蓄積を算出した。その際、信頼度 95% とし、誤差率を求めた。

表-27, 28, 29 は、各階層の判読資料と推定した蓄積をまとめたものである。

なお、OLD GROWTH による場合のプロット材積 (m³) を X とすると、 $\sum X = 1839$, $\bar{X} = 141.46$, $\sum X^2 = 266693$, $S_x^2 = \sum X^2 - (\sum X)^2/n = 6945.23$, 分散 $S^2 = S_x^2/n - 1 = 545.44$, 平均値の分散 $S_{\bar{x}}^2 = S^2/n = 41.96$ であるから、 $S_{\bar{x}} = 6.48$ となる。危険率 5% での t の値は $t = 1.96$ であるから、ha 当たり平均材積は 95% の信頼度をもって、 $141.46 \pm 1.96 \times 6.48 = (141.46 \pm 12.70) \text{ m}^3$ の区間にあることがわかった。したがって無立木地を除いた 290 ha の蓄積は、 $290 \times (141.46 \pm 12.70) \text{ m}^3$, すなわち $37,340 \sim 44,706 \text{ m}^3$ の区間にあることがわかった。

MIDDLE GROWTH では、 $\sum X = 541$, $\bar{X} = 108.20$, $\sum X^2 = 60931$, $S_x^2 = 2394.8$, $S^2 = 598.7$, $S_{\bar{x}}^2 = 119.74$, $S_{\bar{x}} = 10.94$ となった。ha 当たり平均材積は $108.20 \pm (1.96 \times 10.94) = (108.20 \pm 21.44) \text{ m}^3$ の区間にあることがわかった。そこで MIDDLE GROWTH の蓄積は $105 (108.20 \pm 21.44) \text{ m}^3$ すなわち $9,110 \sim 13,612 \text{ m}^3$ の間にあることが推定された。

YOUNG GROWTH では、 $\sum X = 272$, $\bar{X} = 68$, $\sum X^2 = 18870$, $S_x^2 = 374$, $S^2 = 124.67$, $S_{\bar{x}}^2 = 31.17$, $S_{\bar{x}} = 5.59$ となった。ha 当たり平均材積は $68 \pm (5.59 \times 1.96) = (68 \pm 10.96) \text{ m}^3$ の間にあることがわかった。それで YOUNG GROWTH の蓄積は、 $83 \times (68 \pm 10.96) \text{ m}^3$, すなわち $4,734 \sim 6,554 \text{ m}^3$ の区間にあることがわかった。

表—27 OLD GROWTH の判読資料と推定蓄積

Table 27. The results of volume estimated by aerial photographs (old growth stand)

抽出プロット	平均可視樹冠直径 (VCD) (m)	推定蓄積 (m ³ /ha) ($Y = -60.01 + 31.07 \text{ VCD}$)
1	6.3	136
2	7.1	161
3	7.5	173
4	5.8	120
5	6.1	130
6	7.4	170
7	6.5	142
8	5.9	123
9	6.0	126
10	5.4	108
11	5.7	117
12	7.0	157
13	7.6	176
平均	—	141

表—28 MIDDLE GROWTH の判読資料と推定蓄積

Table 28. The results of volume estimated by aerial photographs (middle growth stand)

抽出プロット	平均可視樹冠直径 (VCD) (m)	推定蓄積 (m ³ /ha) ($Y = -290.87 + 77.94 \text{ VCD}$)
1	5.2	114
2	5.1	107
3	4.9	91
4	5.6	146
5	4.8	83
平均	—	108

表—29 YOUNG GROWTH の判読資料と推定蓄積

Table 29. The results of volume estimated by aerial photographs (young growth stand)

抽出プロット	平均可視樹冠直径 (VCD) (m)	推定蓄積 (m ³ /ha) ($Y = -52.66 + 28.24 \text{ VCD}$)
1	4.5	74
2	3.7	52
3	4.3	69
4	4.6	77
平均	—	68

全林の蓄積推定にあたっては、層化一段抽出の比例抽出法によって計算した。したがって標本の平均値 \bar{X} は次の式で求められる。

$$\begin{aligned}\bar{X}' &= \frac{\sum_{i=1}^L N_i \bar{X}_i}{N} \\ &= \frac{(290 \times 141) + (105 \times 108) + (83 \times 68)}{478} \\ &= \frac{57874}{478} = 121 \text{ m}^3/\text{ha}\end{aligned}$$

標本の分散 $S_{\bar{X}}^2$ は

$$\begin{aligned}S_{\bar{X}}^2 &= \frac{1}{N^2} \sum N_i^2 \frac{N_i - n_i}{N_i - 1} \cdot \frac{S_i^2}{n_i} \\ &= \frac{1}{(2988)^2} \left\{ \left(1813^2 \times \frac{1813 - 13}{1813 - 1} \times \frac{23.35^2}{13} \right) + \left(656^2 \times \frac{656 - 5}{656 - 1} \times \frac{24.47^2}{5} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(519^2 \times \frac{519 - 4}{519 - 1} \times \frac{11.16^2}{4} \right) \right\} \\ &= 22.01 \\ S_{\bar{X}} &= 4.69\end{aligned}$$

全林の蓄積は

$$\begin{aligned}V &= N(\bar{X} \pm t S_{\bar{X}}) \\ &= 478(121 \pm 1.96 \times 4.69) \\ &= 478(121 \pm 9.19) \\ &= 57,838 \pm 4,393 \text{ m}^3\end{aligned}$$

つまり、全林蓄積は95%の信頼度で53,445~62,231 m³の間にあることが推定された。

III 推定の精度

蓄積推定の精度は次の計算式によって求めた。

$$\text{誤差率} = K \frac{S_{\bar{X}}}{\bar{X}'}$$

まず次式により $S_{\bar{X}}$ を求めた。

$$S_{\bar{X}}^2 = \frac{1}{N^2} \sum N_i^2 \frac{N_i - n_i}{N_i - 1} \cdot \frac{S_i^2}{n_i}$$

ここで、 N は母集団の抽出単位総数 (2988)、 N_i は i 層内の抽出単位総数 (OLD GROWTH 1813, MIDDLE GROWTH 656, YOUNG GROWTH 519)、 n_i は i 層標本内の抽出単位個数 (OLD GROWTH 13, MIDDLE GROWTH 5, YOUNG GROWTH 4)、 S_i^2 は分散 (OLD GROWTH 23.35, MIDDLE GROWTH 24.47, YOUNG GROWTH 11.16)、 K は 1.96 である。

上式の結果、 $S_{\bar{X}}^2 = 22.01$ 、 $S_{\bar{X}} = 4.69$ となった。

次に上式で求めた $S_{\bar{X}}$ を用い推定誤差率を算出した。すなわち

$$\begin{aligned} \text{誤差率は } K \frac{S_x}{\bar{X}} \\ &= 1.96 \times \left(\frac{4.69}{121} \right) \times 100 \\ &= 7.60\% \end{aligned}$$

と求められた。

第6章 結言と摘要

I 結 言

森林調査は、経営計画をたてるための基礎となるが、この調査には、地況調査と林況調査の2タイプがある。このうち林況調査は、森林を構成する樹木あるいは、林分につき、その樹種の質的構成や、面積、胸高直径、樹高、樹冠直径、蓄積および生長量などの量的要素、また下層植生、種類、その繁茂状態などを総括的に調査するものである。

このような森林調査、特に蓄積の調査は、経営計画の樹立の上で欠かすことの出来ない決定的に重要な調査要素である。さらに蓄積を推定しようとする場合には、でき得るかぎり精度の高いことが要求される。

インドネシアにおいて、特にジャワ以外の広範な森林に対して蓄積調査を行うにあたり、それが地上調査によるものである場合は多数の人員で長期間にわたること、地利が不便で費用を多く要することなどから、しばしば航空写真の利用がはかられており、その価値が認められている。

航空写真が森林調査に利用されるようになってすでに久しく、これまでに莫大な量の航空写真が森林を対象として撮影されており、それらを使って多数の研究や調査が行われてきた。しかし航空写真による森林の蓄積推定の誤差は、依然として解消されていない。したがって現在これはほとんど利用されていない。

航空写真による森林の蓄積推定では、その精度を高めるため、一般に階層分けを行う。従来の蓄積推定の研究では、人工林の場合は階層分けを行わず、航空林分材積表を用いて森林の蓄積を推定する方法がとられていた。このため精度が低くなっていた。一方天然林においては、従来は針葉樹林、広葉樹林のように林相によって階層分けを行い、さらにそれぞれについて航空林分材積表を調製し、蓄積を推定する方法が行われてきた。しかしこの精度も高くなく、階層分けの基準として必ずしも十分とはいえなかった。

そこで、本研究では人工林に対してはデジタルカラー写真により地位を区分し、収穫表を併用して、蓄積の推定を試みた。また天然林に対しては、カラー写真により、林相を OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH の3階層に区分して、蓄積の推定を試みた。

研究の対象は、インドネシアのメルクシマツに比較的類似したアカマツ人工林、ならびに

インドネシアに広く分布する原生林 OLD GROWTH に近似した林分を含んだ天然林とした。

人工林で蓄積を推定する場合、従来の方法では誤差が大きすぎて有効でなかったため、本研究では次の方法によって蓄積の推定を行った。すなわち、① デジタルカラー写真により地位区分を行う、② 地上で実測した各標準地における樹冠疎密度を航空写真から判読する、③ 標準地ごとに、実測樹高を収穫表のそれと対照して適用収穫表の地位を決定する、④ 標準地材積と、その標準地に対応した地位の収穫表材積との比で立木度を計算する、⑤ 航空写真上における各標準地の樹冠疎密度 (X) と立木度 (Y) の関係を $Y=a+bX$ の式で求める、⑥ 次に航空写真上で地位ごとに標準地を比例または NEYMAN 抽出法を適用して Sampling し、これの樹冠疎密度を求める、⑦ この樹冠疎密度をそれぞれ $Y=a+bX$ の式に代入して、Sampling した標準地の立木度を計算する、⑧ その立木度に適用収穫表の材積を乗じ、標準地の蓄積を求め、同時に対象森林 (母集団) の蓄積と誤差率を層化一段抽出法の比例抽出法または NEYMAN 法により計算する。この手法を用いることによって、従来の方法よりも精度がさらに高くなることが明らかになった。

一方、天然林を対象とした従来の方法も、精度が低く利用しにくかったため、筆者は以下の方法によって蓄積の推定を行った。すなわち、① カラー写真により林相を OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH の3階層に区分する、② 各標準地における樹冠直径 (X) を航空写真から判読する、③ 航空写真上における各標準地の樹冠直径 (X) と各標準地の実測材積 (Y) の関係を $Y=a+bX$ の式で求める、④ 次に林相つまり各階層ごとに比例または NEYMAN 抽出法を適用して Sampling した標準地の樹冠直径を求める、⑤ この樹冠直径をそれぞれ $Y=a+bX$ の式に代入して、Sampling した標準地の蓄積を計算する。次に、対象森林 (母集団) の蓄積と誤差率を計算する。この手法を用いることによって従来の方法よりも精度がさらに高くなることが明らかになった。

筆者がアカマツ人工林を対象として試みた手法は、インドネシアのメルクシマツに対して適用することができ、しかも高い精度でその蓄積を推定することが可能と考えられる。一方、インドネシアの天然林は現状では OLD GROWTH が多いが、今後、YOUNG GROWTH が増加していく状況が考えられるので、筆者が苫小牧地方の天然林を対象として試みた方法は、近い将来インドネシアの天然林を対象として適用することができ、しかも比較的高い精度でその蓄積を推定することが可能と考えられる。

II 摘 要

1) この研究の目的は、インドネシアのメルクシマツに比較的類似したアカマツ人工林ならびに広葉樹天然林を対象とし、航空写真を利用して、それらの蓄積を高い精度でかつ能率的に推定する方法を確立することである。

2) この研究では、人工林に対してはデジタルカラー写真により地位を基準として階層区分し、収穫表を併用して、蓄積を推定する方法を試みた。また広葉樹天然林に対してはカラー

写真を用い、林相を基準として OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH に階層区分し、蓄積を推定する方法を試みた。

3) 人工林の研究対象地は、野辺地営林署管内のアカマツ人工林 55 年生 16.42 ha である。野辺地営林署は総面積約 11,000 ha の内、約 6,000 ha がスギ、アカマツ等の人工林であり、この内、アカマツ人工林は約 2,200 ha (38%) である。広葉樹天然林の研究対象地は、北海道大学苫小牧地方演習林である。この演習林の総面積は 2,740 ha で、人工林地の約 800 ha を除くと、その大部分が天然の広葉樹林である。天然生広葉樹林 (1,476 ha) のうち 478 ha が本研究の対象地域である。

4) アカマツ人工林の対象地域の航空写真は、1975 年の 10 月に撮影されたもので、撮影高度 1,410 m、写真縮尺 1/4,600 である。広葉樹林の対象地域で用いたカラー写真は 1981 年の 10 月に撮影されたもので、撮影高度 1,580 m、写真縮尺 1/10,000 である。

5) デジタルカラー写真の分析の結果、アカマツ対象地域 16.42 ha のうち、地位上の林地は 7.02 ha、地位下の林地が 9.40 ha であった。また、広葉樹林では、カラー写真判読の分析の結果、対象面積 478 ha のうち、OLD GROWTH の林地は 290 ha、MIDDLE GROWTH の林地は 150 ha、YOUNG GROWTH の林地は 83 ha であった。

6) 人工林では航空写真を用いて森林蓄積を推定するとき、立木度 (Y) と樹冠疎密度 (X) との関係が地位上では $Y = -0.446 + 1.468 X$ 、地位下では $Y = 0.107 + 0.909 X$ の式が適用可能であった。天然林では、実測材積 (Y) と平均可視樹冠直径 (X) との関係が OLD GROWTH $Y = -60.01 + 30.07 X$ 、MIDDLE GROWTH $Y = -290.87 + 77.94 X$ 、YOUNG GROWTH $Y = -52.66 + 28.24 X$ 式が適用可能であった。

7) 人工林では、写真上でプロットを Random に抽出した。この方法で必要な抽出プロット数は比例抽出法により求めた。参考のために、NEYMAN 抽出法によってプロット抽出数を求め比較検討した。以上の結果、必要なプロット数は、地位上、下ともそれぞれ 2 個となった。なお NEYMAN 抽出法の結果もそれぞれ 2 個となったが、この研究では安全をみて、地位上、下ともそれぞれ 4 個ずつ設定することにした。天然林では、比例抽出法の結果、必要なプロット数は、OLD GROWTH, MIDDLE GROWTH, YOUNG GROWTH, それぞれ 13, 5, 4 個であることがわかった。NEYMAN 抽出法の結果は OLD GROWTH 14 個, MIDDLE GROWTH 5 個, YOUNG GROWTH 3 個となった。しかしこの研究では、層ごとの抽出プロットの片寄りを出来るだけ少なくすることを考慮し、比例抽出法によって求めたプロット数を各層ごとに設定し、材積を求めた。

8) 人工林では、航空写真上で地位ごとに標準地を Sampling してその樹冠疎密度を求め、それらを前掲式 $Y = -0.446 + 1.468 X$ (地位上), $Y = 0.107 + 0.909 X$ (地位下) に代入して、標準地ごとの立木度を計算し、その立木度に適用収穫表の材積を乗じ、標準地の蓄積を求めた。一方、天然林においては、航空写真上で林相ごとに標準地を Sampling してその平均可視樹冠直

径を求め、それらを $Y = -60.01 + 31.07 X$ (OLD GROWTH), $Y = -290.87 + 77.94 X$ (MIDDLE GROWTH), $Y = -52.66 + 28.24 X$ (YOUNG GROWTH) に代入して標準地ごとの蓄積を計算した。

9) 以上の結果、層化一段抽出の比例抽出法によって推定した人工林の蓄積は 3,890~4,222 m³ の間にあるといえる。また蓄積推定の精度は 4.09% であった。

10) また天然林では、層化一段抽出の比例抽出法によって推定した蓄積は 53,445~62,231 m³ の間にあるといえる。また蓄積推定の精度は 7.60% であった。

11) 以上述べてきたように、本研究で人工林を対象として試みた蓄積推定の方法はインドネシアのメルクシマツに対して適用することができ、しかも高い精度でその蓄積を推定することが可能と考えられる。また、インドネシアの天然林は現在 OLD GROWTH の多い森林であるが、今後 YOUNG GROWTH が増加していく状況が考えられるので、筆者が苫小牧の天然林を対象として試みた森林蓄積の推定の方法も、近い将来インドネシアの天然林を対象として適用することができ、しかも比較的高い精度でその蓄積を推定することが可能と考えられる。

参考ならびに引用文献

- 1) ALLISON, G. W. and BREADON, R. E.: Timber volume estimated from aerial photographs, Forest Survey Notes 5, British Columbia Forest Service, Victoria B. C. 17, 1960.
- 2) American Society of Photogrammetry: Manual of color aerial photography, 393-395, Falls Church, Virginia, 1968.
- 3) American Society of Photogrammetry: Manual of remote sensing, 98-112, Falls Church, Virginia, 1975.
- 4) 青森営林局: 第3次地域施業計画書, 5-58, 1979.
- 5) ATMAWIDJAYA Rubini: The importance of aerial photograph for forestry in Indonesia, 27, Biotrop, Bogor, 1978.
- 6) ATMAWIDJAYA Rubini: Inventory system in pure *Agathis lorantifolia* stand using double sampling technique with aerial photograph, 19, Biotrop, Bogor, 1978.
- 7) AVERY, T. E.: Forester guide to aerial photo interpretation, Agriculture handbook, No. 308, 10-15, USDA Forest Service, 1966.
- 8) AVERY, T. E.: Interpretation of aerial photographs, 17-20, Burgess Publishing Co, Minneapolis Minn, 1977.
- 9) BECKING, R. W.: Forestry applications of aerial color photography, Photogrammetric Engineering, Vol. XXV No. 4, 559-565, 1959.
- 10) 長 正道: 空中写真濃度計測による森林調査法に関する研究, 九大演報 (48), 114, 1974.
- 11) SCHANDA Erwin: Remote sensing for environmental sciences, 42-77, Springer Verlag, Berlin, 1976.
- 12) ESTES and SENGER: Remote sensing techniques for environmental analysis, 15, Hamilton Publishing Company, Santa Barbara, California, 1974.
- 13) FREESE Frank: Elementry forest sampling, 17-20, Burgess Publishing Company, Washington, D. C., 1962.
- 14) 春木雅寛: トドマツ人工林の物質現存量に関する基礎的研究, 北大演報, 36 (3), 160-165, 1979.
- 15) 菱沼勇之助: 森林施業への航空写真の利用. 谷口教授退官記念会編, 林業の経営と森林施業, 北大図書刊行会, 202-219, 1980.

- 16) 菱沼勇之助: 航空写真による森林の健全性の識別に関する研究, 北大演報, 36(1), 5-11, 1979.
- 17) 北大農学部附属演習林: 苫小牧地方演習林の概要, 1983.
- 18) HUSCH, MILLER and BEERS: Forest mensuration, 241-253, John Wiley and Sons, New York, 1972.
- 19) HUSCH, B: Forest mensuration and statistics, 350-360, The Ronald Press Company, New York, 1963.
- 20) 石川善朗: 航空写真によるスギ人工林の地位判定に関する研究, 23-32, 北海道大学博士論文, 1981.
- 21) 伊藤 忠: 赤外カラーによる樹木活力のパターン化, 環境情報科学, 5(1), 64, 1976.
- 22) 木梨謙吉: 森林調査詳説, 315-317, 農林出版株式会社, 東京, 1978.
- 23) 国際協力事業団: 森林施業計画基準作成調査報告書, 18-52, 1981.
- 24) LOETSCH and HALLER: Forest inventory Vol. 1, 360-365, BLV Verlags Gesellschaft, Munchen Basel Wien, 1964.
- 25) LOETSCH, ZOEHRER and HALLER: Forest inventory Vol. 2, 334-336, BLV Verlags Gesellschaft, Munchen Basel Wien, 1973.
- 26) LUEDER, D. R.: Aerial photographic interpretation principles and applications, 386-400, Mc Grow-Hill, New York, 1959.
- 27) MEYER, Recknagel *et al*: Forest management, 117, The Ronald Press Company, New York, 1961.
- 28) 森 忠次・服部 進: 赤外カラー写真の測色による緑被地の分離法, 写真とリモートセンシング, Vol. 15, No. 2, 9, 1976.
- 29) MURTHA, P. A.: A guide to photo interpretation of forest damage in Canada, 12, Canadian Forestry Service, Ottawa Canada, 1972.
- 30) 中島 巖: 航空写真による新しい森林のしらべ方, 2, 林業科学技術振興所, 東京, 1965.
- 31) 中島 巖: 森林航測概要追補. 応用編, 3-10, 地球出版, 東京, 1972.
- 32) 中島 巖: 空中写真利用による森林調査法に関する研究, 林試研報, 251, 10-15, 1973.
- 33) 日本林業技術協会: 林業百科事典, 1042-1043, 丸善, 東京, 1971.
- 34) 大金永治: デジタルカラー写真の林業への応用, 北方林業, 24(8), 217-223, 1972.
- 35) 大金永治・板垣恒夫: デジタルカラー写真による地位判定の構想, 林 (3), 1-4, 1972.
- 36) 大金永治・板垣恒夫: デジタルカラー写真によるトドマツ造林地の地位判定, 第83回日林講, 92-95, 1972.
- 37) 大金永治・板垣恒夫: デジタルカラー写真の森林計画調査への応用, 林業技術 (362), 10-13, 1972.
- 38) PAINE, D. P.: Aerial photography and image interpretation for resource management, 252-260, John Wiley and Sons Inc, New York, 1981.
- 39) PAUL R. Wolf: Elements of photogrammetry, 458-460, Mc Grow-Hill, Kogaku-sha, Tokyo, 1974.
- 40) SMITH, H. T. U.: Aerial photograph and their application, 5-15, Appleton Century- Crofts Inc, New York, 1974.
- 41) SPURR, S. H.: Aerial photographs in forestry, 290-300, The Ronald Press Company, New York, 1948.
- 42) SPURR, S. H.: Photogrammetry and photo interpretation with section on applications to forestry, 215, The Ronald Press Company, New York, 1960.
- 43) STEEL and TORRIE: Principles and procedures of statistics, 210, Mc Grow-Hill, New York, 1960.
- 44) SUMANTRI, SOEWITO and ENDOM: Logging in natural forest in Indonesia, XVII IUFRO World Congress Proceeding Division 3, 433-447, 1981.
- 45) SUTANTO: Pengetahuan dasar interpretasi citra, 33-41, Gajah Mada University Press, Jogjakarta, 1979.
- 46) 高橋教夫・谷口信一: マルチスペクトル写真における樹種の濃度測定, 第86回日林講, 80, 1975.

- 47) 高橋教夫： 航空写真による樹種の識別に関する研究，北大演報，36(2)，86-88，1979。
 48) 武田裕幸・今村遼平： 空中写真判読，4-10，共立出版，東京，1976。
 49) TANIGUCHI Shinichi： Forest inventory by aerial photographs，北大演報，21(1)，29，1961。
 50) 谷口信一： 航空写真による林木蓄積の査定法，北方林業そう書，15，16，札幌，1960。
 51) 谷口信一・大金永治他： 航空写真によるトドマツ人工林の蓄積推定，日林北支講，22，13-14，1973。
 52) 渡辺 宏： 新森林航測テキストブック，74-79，日本林業技術協会，東京，1980。

Summary

1. In order to establish an accurate estimation of growing stocks by aerial photographs, the author selected artificial forests of *Pinus densiflora* that is comparatively similar to *Pinus merkusii* growing in Indonesia as well as natural stands of broad leaved forests, and carried out the following study.

2. From the result obtained by the analysis of digital color photographs, the author divided artificial forests according to the classification of site quality, and estimated the growing stocks together with use of the yield table.

And also, through the analysis of real color photographs, the author divided natural forests according to the classification of forest physiognomy (texture), and estimated the growing stocks.

3. In Noheji working area under Aomori Regional Forestry Office (*Pinus densiflora* stand, 16.42 ha) the artificial forests were selected for the investigation, and in Tomakomai Experiment Forest, Hokkaido University the natural broad leaved forests (478 ha) were also selected.

4. The result showed that *Pinus densiflora* forests were divided into two stands, i. e. good site quality stand (7.02 ha) and bad site quality one (9.40 ha), while the natural forests were similarly divided into three stands, i. e. old growth (290 ha), middle growth (150 ha) and young growth stand (83 ha).

5. The relations between the stand density (Y) and the crown density (X) in the artificial forests were given by the following regression equations:

$$\text{Good site quality stand: } Y = -0.446 + 1.468 X$$

$$\text{Bad site quality stand: } Y = 0.107 + 0.909 X$$

On the other side, the relations between the measured volume (Y) and the visible crown diameter (X) in the natural forests were given by the following regression equations:

$$\text{Old growth stand: } Y = -60.01 + 30.07 X$$

$$\text{Middle growth stand: } Y = -290.87 + 77.94 X$$

$$\text{Young growth stand: } Y = -52.66 + 28.24 X$$

6. After the necessary number of sample plots was calculated by Proportionate Sampling Method (Stratified One Stage Sampling), they were settled at random on the corresponding aerial photogram. And then, using the above equations, the stand volumes were estimated in each classified site quality and forest physiognomy (texture).

7. The error on the estimation of the growing stocks obtained by Proportionate Sampling Method was 4.09% and 7.60% for the artificial forests, and the natural forests.

It was shown from these results that the estimation is very accurate.

8. According to the above-mentioned fact, the author believes that the method of this growing stock estimation would be also applicable to *Pinus merkusii* forests and broad leaved forests in Indonesia.