

# 空中写真濃度計測による森林蓄積の推定に関する研究

長, 正道

<https://doi.org/10.15017/14806>

---

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 48, pp.113-292, 1974-03. 九州大学農学部附属演習林  
バージョン :  
権利関係 :

規増設，組合せや改善，工夫等によっては他の要因についてもさらにその適用化が期待されるであろう。

なお，本蓄積推定の対象とした森林はスギ，ヒノキ，同混交林，マツ，および広葉樹の各樹種よりなっている。全体蓄積の推定はこれらの各樹種をこみにして行なったが，それぞれ樹種別の蓄積推定を行なう場合も，そのシステムは全く同じである。また面積も一応1枚の空中写真をもって大面積森林とみなしたが，さらに広い範囲についてその推定を実施する場合も手法としては全く同じ理論が適用される。

## 第6章 総 括

### §6-1 研究成果の要約

空中写真濃度計測による森林蓄積推定の基本的原理は写真が有する濃淡色調のコントラストの変化に対するパターン認識にその基盤をおく。

すなわち森林を被写体とする空中写真では各種の森林構成要因，たとえば樹種や林齢，密度等のそれぞれに起因する反射光量や波長差が濃度要因としてきわめて正確にフィルムまたは印画写真上に撮影され記録・表現されているから，これらの濃度要因を光学的システムと工学（機械）的メカニズムにもとづく写真濃度測定装置（Photo densitometer）によって計測させることにより，写真濃度と材積，本数その他の推定要因と結びつけること，つまり相関関係を究明することにある。

以上の濃度計測に対する基本的原理と計測システムにもとづいて，本研究はまず第1章で従来の Interpretation による森林蓄積推定に視点を向け，その推定方法に対する特長と推定結果の精度その他の成果および問題点等を解明し，これに対応する推定方法としての写真濃度計測システムの優位性を Interpretation による場合と対比させながら示した。

すなわち，Interpretation による場合，材積との相関がもっとも高い判読測定要因の一つである樹高の測定が困難であること，各主要判読要因である樹冠直径（ $CD$ ），樹高（ $H$ ），本数（ $N$ ），樹冠疎密度（ $CC$ ）等の判読測定値については判読者間に変動性，つまり有意差を生じ，また判読測定に経験と熟練度が要求されること，プロットサイズのちが（大小）が推定精度に影響しそのため功程を大きく左右すること，および将来への方向としての自動計測化に対し Interpretation は限界があること等の問題点から，それらの解決を図る方法，とくに測定値の普偏化とスピード化，推定精度の向上ならびに自動計測化システムへの指向の面から濃度計測による蓄積推定がきわめて優れた方法であるとの立場をとった。これにもとづき Interpretation による判読測定要因と濃度計測の関連性を，予備テストを交え写真濃度計測システムにもとづいて個々について対比させながらその方式と理論を組み立て，濃度計測による蓄積推定の可能性を提起した。そして空中写真濃度計測の特長と利用形態に対する今後の指向性，とくにその中で理論的に Sampling techniques との結びつきがもっとも適していることを指摘し，蓄積推定に対する濃度計測システムの位置づけと研究の方向性を明らかにした。

Interpretation に対する問題点およびこれに代わる森林空中写真の調査方法として濃度計測システムとその方式等の以上の理論的根拠にもとづき，第2章では写真濃度測定装置を対象に森林蓄積推定への利用化の可能性と計測値の信憑性等を明らかにすることを目的

に各種の基礎実験を試みた。

すなわち § 2-1 でホトマル安定電源部, ホトマル受光部, 光電機構・操作部, 直流増幅部および記録部の基本装置に対し, 標準濃度片 (Density step tablet), 色調板 (Photo tone scale), 樹冠疎密度板 (Crown density scale) 等による濃度波形の予備実験, ならびに写真濃度計測装置各ゲージの機能とその変化・組合せにもとづく森林空中写真濃度波形の実験と分析検討を行なった。その結果, 濃度波形の予備実験では標準濃度片, 色調板, 樹冠疎密度板等の濃度レベル, 形状, 個数がきわめて正確な対応性をもって計測されることが確かめられた。また計測装置各ゲージの変化・組合せによる森林空中写真濃度波形はその形状判読, 樹種識別および波形グラフ計測上の各視点から, 写真濃度測定装置 (本体) 部分はスリット幅  $0.04\text{mm} \sim 0.08\text{mm}$  ( $x$  方向)  $\times 0.10\text{mm} \sim 0.20\text{mm}$  ( $y$  方向), レンズ絞り 1.4, 資料送り速度  $5\text{mm} \sim 10\text{mm}/\text{min}$ , 感度切替レンジ  $\times 1$ , フィルター 2 $\sim$ 1 枚, 直流増幅器部分は感度切替倍率レンジ  $\times 30 \sim \times 10$ , 記録計部分はチャートスピード  $120\text{mm} \sim 240\text{mm}/\text{min}$ , Input voltage range (入力電圧レンジ)  $0.5\text{V}$  を中心に  $0.1\text{V}$  または  $1\text{V}$  等が最適組合せゲージであることを明らかにした。

また § 2-2 で写真濃度の自動計測化のための装置としてユニバーサルカウンター (Universal counter) および A-D コンバーター (Analogue-Digital converter) を増設し, 濃度周波数, 濃度波周期, 濃度波形側断面面積等の各計測要因の自動計測化を可能にし, さらにデジタルタイマー (Digital timer), デジタルレコーダー (Digital recorder) を新たに組合せることにより, 各種濃度要因の計測と記録をすべて自動的に行なえるようにした。これらによって写真濃度の自動計測化はほぼ達成されたといえる。なおこの結果, 写真濃度の計測システムは従来の面積または長さ (距離) に代りタイムユニット, つまり時間を単位とする計測方法によって行なわれることが一つの特長となる。

さらに § 2-3 では透過式計測による基本装置に対し新しく反射式計測装置の増設・改造とその計測精度ならびに透過式の場合との対応性等に対する比較実験分析を行ない, その結果, 従来のポジフィルムのみによる濃度計測から印画写真による濃度計測の実用化を図った。これにより現地チェックその他各種の写真引伸スケールの使用および濃度計測実験等の面で一段と至便性をうるにいたった。

第 2 章における濃度計測各装置の空中写真濃度計測への適用化の可能性が確かめられたあと, 第 3 章では空中写真濃度計測要因に対し模型, 模式図にもとづく考察および実際の森林を対象として濃度波形に対する各種の分析検討を試みた。

すなわち森林蓄積推定のための濃度要因として本数 (密度), 樹冠直径, 樹種, 年齢 (齢階) 等の計測因子をえらび, これらに対する濃度波形の基礎分析として, 本数に対しては濃度波形のピーク数, 樹冠直径に対しては波形の基部幅, 樹種に対してはスギ, ヒノキ, マツおよび広葉樹の各主要樹種を対象に濃度レベルと波形の形状, 年齢に対しては幼, 壮齢林について濃度レベル, のそれぞれを対比させてその濃度計測と回帰計算にもとづく相関度, つまり対応性の分析検討を行なった。

その結果, 本数とピーク数の関係は森林濃度波形ピーク数を独立変数  $x$ , 対応するプロット実本数を従属変数  $y$  としたとき

$$Y = 4.4058 + 1.1585 x$$

$$r = 0.939$$

をえた。また回帰の分散分析は常数項、 $x$  の項ともに有意となり、本数とピーク数とは高い相関関係にあることが確かめられた。

樹冠直径と濃度波形の基部巾の関係は、樹冠直径測定板 (Diameter scale) による実験の結果、濃度波形の基部幅を独立変数  $x$ 、対応する樹冠直径測定板の直径 (サイズ) を従属変数  $y$  としたとき

$$Y = -0.6309 + 8.0655 x$$

$$r = 0.995$$

ときわめて高い相関関係をえた。また一般的に考えられる樹冠の形状として円錐体、楕円体、放物線体、半円体の4種類について、直径2cmより8cmまでの7段階、高さ1cmより14cmまでの24段階、合計406個を設計・製作し、その中から直径サイズ大, 中, 小の14個をえらび、写真撮影にもとづく濃度波形基部幅との関係を、樹冠模型の直径 (平均値) を  $y$ 、対応する濃度波形基部幅 (判読直径) を  $x$  として回帰計算により求めた結果は

$$Y = 0.0954 + 2.1123 x$$

$$r = 0.999$$

となり、上記の樹冠直径測定板による場合と同様にきわめて高い対応性が認められた。実際の森林空中写真では林木樹冠の構成状態および濃度計測線のスキミング位置と方向等の組み合わせにより複雑な波形の形状と対応関係を呈するものと予想されるが、しかし上記の2つの実験結果から濃度計測による森林空中写真の樹冠直径の計測が波形基部幅という因子により可能であることが確かめられた。なお太陽光線に対する並列方向が平行方向と直角方向の2方向で連続並列と間断並列 (1つとばし) の場合は平行方向で間断並列のときが直径サイズに正確に対応することが上記の実験と併行して試みた実験分析の結果から判明した。

樹種および年齢 (齢階) に対する濃度波形の分析はスギ、ヒノキ、マツおよび広葉樹の各主要樹種に対し、濃淡色調のコントラストおよび反射光量、波長差にそれぞれ相違性を有することに着目し、濃度レベルと濃度波形の構成状態にもとづく単峰、複峰、3峰、多峰等の形状について試みた。すなわち濃度レベルは濃度波形の上下のピークの値を各樹種および幼、壮の齢階についてグラフ上で測定し分散分析を行なったところ、きわめて高度の有意差、つまり各樹種および幼、壮の齢階における濃度レベル間に明らかな差異を示した。またそれぞれの濃度平均値に対する  $t$ -検定でも同様の結果をえた。また単峰、複峰、3峰、多峰等の波形の形状分類にもとづく  $\chi^2$ -検定の結果でもスギ、ヒノキ、マツおよび広葉樹の各樹種間には顕著な差異を示した。そしてその形状はそれぞれスギ壮齢林は単峰および複峰よりなる複合体、同幼齢林は複峰 (2~3峰)、ヒノキ壮齢林は2~3峰、同幼齢林は軽度の複峰、マツ壮齢林は主として単峰よりなりわずかに複峰を含む単峰型、同幼齢林は単峰 (部分的に2~3峰)、広葉樹は複峰と3峰を主体とし部分的に単峰を含むが全体的には多峰型を呈することが認められた。

森林蓄積推定のための主要計測因子である本数、樹冠直径、樹種、年齢等の濃度要因に対して試みた模型、模式図および実際の森林に対する以上の濃度波形の基礎的分析検討の結果から、写真濃度測定装置による森林空中写真濃度計測化の可能性がえられたので、そ

の成果にもとづいて第4章では各種濃度要因と森林蓄積の対応関係を、主として回帰式による相関関係および回帰係数の有意性検定のための分散分析によって検討を加えた。

なお、検討に先だち現地森林調査線 (Strip) と写真濃度計測線 (Densitometer strip) がどの程度に対応しているかについてをチェックのため、Strip が①写真主点Pを通る放射線と交叉する場合、および②写真主点Pを通る放射線上にある場合の2つのケースについてその Displacement (ズレ) の状態および Displacement の量の計算方法に対する究明と分析検討を試みた。その結果は現地森林の起伏および傾斜の状態と度合いにより①の場合は濃度計測線上において放射線方向につねに(+)または(-)の Displacement を生じ、またその量の計算はきわめて繁雑である。これに対し②の場合は放射線上、つまり濃度計測線上においてのみ(+)、(-)の Displacement を生じ、その状態は対象とする地形がPレベル面よりも高いときは(+)の方向に、低いときは(-)に Displacement することがその計算式とともに確かめられた。したがって現地実測線と写真濃度計測線との厳密な対応を必要とする場合は②の方法、すなわち現地実測線は写真主点Pを通る放射線上に設定することが適切であるとの判断がえられた。これにより蓄積との関係に対する以下の各検討は②の方法によってすべて現地調査を行なった。

検討は森林空中写真濃度波形 (波形基部幅、ピーク数) と材積、濃度波周期と材積、および濃度波形側断面積と材積のそれぞれの関係について行なった。

濃度波形と材積の関係についてはまず宮崎県えびの営林署管内67林班小小班、面積19.78 haの51年生スギ林を対象に、幅10m×長さ210mのストリップ、ただし最小単位 (Ultimate unit) 10m×10mプロット21個の資料により材積回帰式の試験的分析検討を行なった。その結果

$$Y = -0.577 + 0.741 x_1 + 0.199 x_2$$

$$SE = \pm 0.269 \text{ m}^3$$

ただし  $x_1$  : 平均波形基部幅

$x_2$  : ピーク個数

$Y$  : プロット材積

をえた。そして回帰式の標準誤差率はプロット平均材積の12.3%となった。

これにより蓄積推定の一応の可能性がえられたので、同じくえびの営林署管内68、69林班全域、面積92.54haのスギ、ヒノキ、マツおよび広葉樹林(一部)を対象に、はじめ全体から7本の Densitometer strip をとり、ついでその中から幅4m×長さ50mを最小単位とする Field strip 3本、プロット総数40個を抽出・測定する、いわゆる二重標本抽出法にもとづき、まず材積回帰式の計算を波形基部幅のみによって行なった結果

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x})$$

$$= 4.1014 + 1.7184(x - 3.4029)$$

$$SE = \pm 0.2499 \text{ m}^3$$

ただし  $b$  : 回帰係数

$x$  : 波形のプロット毎平均基部幅

$\bar{x}$  : 波形の全プロット平均値

$\bar{y}$  : 全プロット平均材積

Y : 0.01haプロット材積

をえ、その相関係数  $r=0.751$  となった。これより大標本のプロット総数89にもとづく濃度波形の総平均基部幅3.3073mmから1ha当り平均材積393.71m<sup>3</sup>となった。したがって対象全面積 92.54haに対する 95%確率での推定材積は

$$\begin{aligned} & 92.54 \times (393.71 \pm 2 \times 24.99) \\ & = 36433.92\text{m}^3 \pm 4625.15\text{m}^3 \end{aligned}$$

となった。すなわち材積推定範囲 31808.77m<sup>3</sup>~41059.07m<sup>3</sup>，その誤差率は 12.7%をえ、材積推定に対する一応の成果がえられた。

濃度波周期と材積の関係は周期  $(\frac{1}{N})$  と対応するプロット材積  $y$  について、 $y$  を重みづき平均値により、宮崎県えびの営林署管内の (A) 黒鹿国有林 68, 69 林班スギ, ヒノキ, マツ, 広葉樹 (一部), Field strip 1, 2, 3, 4 m×50mプロット総数 40個, および (B) 川添国有林70~73林班広葉樹林, 40m×40mプロット26個のそれぞれを対象に材積回帰式の計算を試みた。その結果

$$\begin{aligned} \text{(A)} : Y &= 9.6740 - 7.8281 \left(\frac{1}{N}\right) \\ r &= -0.576 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(B)} : Y &= 47.1508 - 75.4122 \left(\frac{1}{N}\right) \\ r &= -0.543 \end{aligned}$$

となった。

また濃度周波数と材積の関係は周期による場合との精度の比較対応を目的として上記と同じ (A), (B) を用い、濃度周波数を  $x$ , 対応するプロット材積を  $y$  として、重みづき平均値の場合の材積回帰式

$$\begin{aligned} \text{(A)} : Y &= 4.358 + 0.417 x \\ r &= 0.619 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(B)} : Y &= 26.902 + 1.299 x \\ r &= 0.516 \end{aligned}$$

重みをはずし、それぞれを代表値とみたてたときの材積回帰式

$$\begin{aligned} \text{(A)} : Y &= 4.001 + 0.489 x \\ r &= 0.658 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(B)} : Y &= 26.831 + 1.477 x \\ r &= 0.574 \end{aligned}$$

となった。

すなわち樹冠直径に対応する周期および樹冠本数に対応する周波数ともに材積との回帰関係の成立が認められた。その相関係数  $r$  は周波数の場合がやや高い値を示す。このことは今後の自動計測化に対する主要計測要因の一つとして大きく期待されるものと考えられる。

さらに濃度波形基部幅, 波形ピーク数, 濃度波周期および濃度周波数等の以上の各濃度要因が総合的に包括された濃度成分として森林空中写真濃度波形側断面積をとりあげ、こ

れと材積との対応関係について各種の分析と検討を加えた。

すなわち森林空中写真濃度波形側断面を一応林分側断面 (Stand profiles) とみても、模式図にもとづく理論の設定と分析検討を試み、その立証のうえにたつて各種林分を対象に波形側断面積と材積の関係を波形側断面積を  $x$ , 対応する材積を  $y$  とし、スギ、ヒノキ、マツ等の針葉樹 (N), 常緑樹, 落葉樹 および 常落混交林等の天然生広葉樹林 (L) について各材積回帰式の計算を行なった。その結果はいずれの場合も 1 次式により高い相関がえられ回帰の成立が認められた。また波形側断面積の計測の自動化もあわせて行なった。これにより蓄積推定に対してはきわめて優れた濃度計測要因であることがその実験ならびに分析検討の結果から確かめられた。したがって今後の濃度計測, なかなく大面積森林を対象とする蓄積推定においてきわめて効果的な計測要因であると思考する。

以上の各章において濃度計測に対する基礎的ならびに理論的立証とその成果にもとづき、空中写真濃度計測による大面積森林に対する実際の蓄積推定を第 5 章で実施した。

すなわち大面積森林に対し、まず第 1 ステップとして写真濃度を必要に応じて数レベルに分ち、第 2 ステップで各濃度レベル毎に森林部分と非森林部分の分類を行ない、そして第 3 ステップで森林部分を対象に蓄積の推定を行なうという計測システムをとった。なお推定に先だち、はじめ § 5-1 でその理論的方式を二重標本抽出法 (Double sampling) の手法にもとづいて示し、ついで § 5-2 で濃度レベルにもとづく林相の区分設定を行ない、§ 5-3 で大面積森林の蓄積推定を行なった。

蓄積推定は宮崎県えびの営林署管内作鹿倉, 黒鹿, 川添各国有林を包括する 空中写真, 霧島山地区, 山-456, コース No.9, 写真 No.6, 写真上測定面積 1254.22ha をその対象とした。そしてまず写真全体に対し 10本の Densitometer strip をとり、§ 5-2 にもとづく濃度レベル (A, B, C, D) から森林, 非森林部分の区分およびその中で森林部分の面積の比率を求めた。ついで 5 本の Densitometer strip を抽出し濃度波形側断面積の計測によるスギ, ヒノキ, マツ, 広葉樹の各樹種別および全樹種による材積回帰式の計算と精度, 適合性等のチェックを試みたあと, 単位面積 (1ha) 当りおよび対象全面積当りの蓄積推定を行なった。

すなわち面積比率を A, B, C, D の濃度レベル毎比率

$$w_h = \frac{n'_h}{n'}$$

ただし  $n'$  : 面積推定における First sample

$n'_h$  :  $h$  層のユニット数

および各レベルにおける森林の比率

$$p_h = \frac{n_{hi}}{n_h}$$

ただし  $n_h$  :  $h$  層の Sccond sample

$n_{hi}$  :  $h$  層の Sccond sample の  $i$  ユニット数

から全体の森林比率  $p_{st}$  およびその分散  $V(p_{st})$  を

$$p_{st} = \sum w_h \cdot p_h$$

$$V(p_{st}) = \sum \frac{w_h^2 \cdot p_h \cdot q_h}{n_h - 1}$$

ただし  $q_h : 1 - p_h$

により求めた。その結果森林面積の比率は

$$\begin{aligned} & 100 \times [0.7369 \pm 0.0109] \\ & = 73.69 \pm 1.09 \% \end{aligned}$$

となった。

ついで Second sample にもとづく 5 本の Densitometer strip から求めた、全樹種こみによる濃度波形側断面積 ( $x$ ) と材積 ( $y$ ) の回帰式は

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= \bar{y} + b_1 (\bar{x}_L - \bar{x}_s) \\ &= 186.2289 - 16.5454 (\bar{x}_L - 9.8787) \\ & \quad r = -0.703 \end{aligned}$$

ただし  $b_1$  : 回帰係数

$\bar{x}_s$  : Second sample にもとづく波形側断面積の平均値

$\bar{x}_L$  : Large sample にもとづく波形側断面積の総平均値

$\bar{y}$  : 全体の平均材積

$\bar{Y}$  : 全樹種こみによる ha 当り平均材積

をえた。これより Large sample として 10 本の Densitometer strip から

$$\bar{x}_L = \frac{\sum(x)}{\sum(n)} = \frac{5983.23}{540} = 11.0801$$

をえ、 $\bar{Y} = 166.3513 \text{ m}^3$  となった。なおその分散

$$\begin{aligned} V(\bar{Y}) &= V(\bar{y}) + b_1^2 V(\bar{x}_L) + V(b_1) (\bar{x}_L - \bar{x}_s)^2 \\ &= 178.4017 + 273.7496 \times 0.0316 + 40.0855 \times 1.4432 \\ &= 244.8960 \end{aligned}$$

より標準誤差  $SE$  および誤差率  $e$  は

$$\begin{aligned} SE &= \sqrt{V(\bar{Y})} \\ &= \sqrt{244.8960} = 15.6492 \text{ m}^3 \\ e &= \frac{SE}{\bar{Y}} \times 100 \\ &= \frac{15.6492}{166.3513} \times 100 = 9.41 \% \end{aligned}$$

となった。

一方、蓄積推定の対象面積  $A$  は空中写真、山-456, C9-No.6より

$$\begin{aligned} A &= L \times L \\ &= 3541.5 \times 3541.5 = 1254.22 \text{ ha} \\ & \quad \text{ただし } L = l \times S \\ & \quad = 0.18 \times 19675 = 3541.5 \text{ m} \end{aligned}$$

とした。

したがって全体の蓄積  $V$  は写真面積 1254.22ha に対する森林面積  $A_f$  を

$$\begin{aligned} A_f &= A \times p_{st} \\ &= 1254.22 \times 0.7369 = 924.23 \text{ ha} \end{aligned}$$



により求め、これより

$$\begin{aligned} V &= A_f \times \bar{Y} \\ &= 924.23 \times 166.3513 = 153746.8620 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

その分散

$$\begin{aligned} V(V) &= A_f^2 V(\bar{Y}) + \bar{Y}^2 V(A_f) \\ &= (924.2347)^2 \times 244.8960 + (166.3513)^2 \\ &\quad \times 186.5658 \\ &= 214355350.1457 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ただし } V(A_f) &= A^2 V(p_{st}) \\ &= (1254.22)^2 \times 0.0001186 = 186.5658 \end{aligned}$$

から標準誤差  $SE$  および推定誤差率  $e$  はそれぞれ

$$\begin{aligned} SE &= \sqrt{V(V)} \\ &= \sqrt{214355350.1457} = 14640.8794 \text{ m}^3 \\ e &= \frac{SE}{V} \times 100 \\ &= \frac{14640.8794}{153746.8620} \times 100 = 9.52 \% \end{aligned}$$

となった。

すなわち対象とした空中写真上の森林面積 924.23ha に対する蓄積はスギ、ヒノキ、マツおよび広葉樹の全体で 139105.98 m<sup>3</sup> ~ 168387.74 m<sup>3</sup> の推定範囲を示し、その推定誤差率 9.52% をえ、空中写真濃度の計測にもとづく大面積森林の蓄積推定はその精度とあわせ優れた計測システムであることが確かめられた。

## 6-2 空中写真濃度計測上の問題点と今後の研究課題

いわゆる濃度計測の基本的原理は濃度のパターン認識にその基盤をおく。そしてそのテクノロジーとして光学的システムと電子工学的メカニズムが濃度計測システムの中に組み入れられたものである。空中写真の濃度計測による森林蓄積の推定はこのパターン認識におけるテクノロジーの利用形態の一つをなすものである。

すなわち森林または林木等を被写体とする空中写真において、その濃度を写真濃度計測装置により計測させ材積その他の目的要因との対応関係を究明し、これにもとづいて蓄積その他の推定を行なおうとするものである。そしてこれらは前記各章において実験とその分析検討を試みたごとく、きわめて高精度の推定結果がえられた。

しかし森林はその構成要因であるスギ、ヒノキ、マツ、広葉樹等の各樹種が有するそれぞれの反射光量と波長差によりその色調濃淡のコントラスト、つまり濃度のパターンは複雑に変化する。これに加えて森林の場所や撮影時点のズレ、撮影方法、印画面中央と周囲の光量不均衡、撮影現像焼付処理条件等の相違、ならびに濃度計測装置の基本的原理と性能、とくに各種計測装置の増設・組合わせにもとづく条件の変動性をあわせ有する。

濃度計測装置については本研究では主としてその応用面に主眼をおき実験と検討を試みたにとどまるが、実際にはその性能とあわせ基本的原理の追究とそれにもとづく濃度計測上のつき合わせがさらに必要と認められる。また撮影現像処理条件の相違に関しては濃度

のアンバランスの較正に対する基本的解明がなされなければならないと考える。その方法としては標準濃度片または他の基準となる濃度レベルにもとづく絶対濃度または相対濃度の確立<sup>31)</sup>、撮影条件の統一、現像処理条件による濃度レベルの調整、あるいは計測装置の各種ゲージの組み合わせやフィルター使用等にもとづくレベルの画一化等が考えられる。

さらに濃度計測の面では濃度波周期が濃度周波数 $N$ の逆数 $\frac{1}{N}$ によらなければならない、また周波数と周期の対応関係は計測波形ピーク数に関連するため、樹冠直径との厳密な対応には若干の問題点を残している。これは現実の森林における林木樹冠の構成状態および濃度パターンの複雑性に起因するため多くの困難性がうかがわれる。しかし材積との相関がもっとも高い濃度計測要因の一つとして、その計測システムの究明は推定精度の向上および自動計測化に対する大きな要素を導き出すものと思ふ。

また第4章、§4-3において試みたスギ幼、中、壮齡林の場合のように齡階が異なるとき、あるいは現地実測線(ストリップ)の方向性のちがいに對する BARTLETT's test の結果にみられる、いわゆる異質性の問題については、とくに森林が地形や樹種、年齢、太陽光線に対する光等の条件<sup>104)</sup> が複雑に交錯する各種要因の組み合わせによって構成されることから、それらによって誘導される回帰式の成分には多くの誤差要因をはらんでいるとみなされる。この問題については濃度波形の構成要素、性質等に対する基本的分析解明とあわせさらに検討の必要があろう。

また地形の起伏の状態に起因する写真像の Displacement、とくに写真自体に傾きがある場合の Displacement の問題、および写真からの面積計算に関する問題等についても残された課題としてさらに基礎的な検討とその解明が必要と認められる。

これらの各問題点に対しては今後の研究課題として論理的分析検討とそれにもとづく各種現地調査の実行をすすめ、さらに実証的展開とその究明を試みるつもりである。

### 6-3 空中写真濃度計測による森林蓄積の自動計測化への展望

空中写真濃度の自動計測化に対してはユニバーサルカウンター、A-D コンバーターおよびデジタルタイマー、デジタルレコーダー等の各計測装置の増設・組み合わせによりほぼその目的は達成されたと考える。ただし本研究の最終段階において試みたごとく大面積森林蓄積の推定をより効果的にすすめていく場合には、そのステップの一つとして空中写真の中の森林面積の比率の推定が不可欠となる。そしてその手段として森林、非森林部分の分類あるいは森林部分における細分類のための空中写真の等濃度レベルの設定が必要となってくる。対象とする森林が大面積となるため、それに対応する空中写真の濃度計測データは必然的に膨大となる。これをいちいち肉眼によって計測(読みとり)することは甚だしく浪費的である。これに対しては Photo pattern analyzer のための等濃度面積積算器、等濃度プロッター等<sup>34)</sup>の導入の可能性が考えられ、また必要不可欠でもある。これにより濃度計測の自動化は現段階ではほぼ完成されるものと思ふ。

しかし森林蓄積の推定を最終目標として設定する場合、濃度計測の自動化はそのシステムにおける1ステップを形づけるにほかならない。空中写真の濃度計測による森林蓄積推定の行程を大別すると(1)現地森林調査、(2)濃度計測作業、(3)調査ならびに濃度計測データにもとづく各種の計算、の3部門から成り立つ。そしてこの場合(1)の現地調査は既知のデータが存する場合あるいは空中写真上測定可能な要因については省略されうるし、

また調査の方法もサンプリングその他のテクニックの導入により効率的に実施されるであろう。(2)の濃度計測は上述のごとく現時点ではその一部を除いてはほぼ達成されたのみなされる。したがって問題は(3)の各種の計算作業にある。(1),(2)にもとづく膨大なデータはこれを整理分類して計算行程にもちこむ場合、計算自体はプログラミングによる大型電子計算機の利用が可能であるとしても、そこにいたるまでの準備作業に相当量の手数と時間を必要とする。すなわち(1)現地調査,(2)濃度計測,(3)諸計算の各行程を個々に消化させるのでは自らその自動化に限界を免れないであろう。したがってこれらのすべてを、少なくとも(2),(3)に対しては一連の自動処理システムの中に組み入れる必要がある。またそれが可能となれば分析データの処理能力は超能率化するであろう。そしてその可能性とあわせ考えられる方法としてオンライン・リアルタイムシステム(On line real-time system)がある。

オンライン・リアルタイムシステムとは入力データがその発生個所より直接計算機に入り、そしてその出力データはそれを用いるところに直接送られ、種々の作業の進行する時間に対して計算の処理と応答の時間が十分にまにあい、制御が可能なシステムのことをいう。すなわちこれを濃度計測に適用する場合には濃度計測各装置によって発生するデータがそれに適した端末装置によって捕えられ、その時点で直接大型電子計算機に送られ、直ちに解析処理を受けてその回答(計算結果)は再び必要とする手許に直接送られ速やかに回答結果の分析検討および使用ができるよう、それに適した端末装置に結びつけられることになる。<sup>21)32)64)65)118)</sup>そしてこのシステムは九州大学中央計数施設においてA-D-D-A変換装置の設置が認められ、現在その機種、仕様等の選定がすすめられつつあることとあわせ考え、濃度計測システムのオンライン・リアルタイムシステム化への組み入れに対する今後の検討課題として、いわゆる森林蓄積の自動計測化への展望を示すものといえよう。

一方、濃度計測に関しては現在のパンクロマチックフィルム(Panchromatic film)のみにとどまらず、赤外線フィルム(Infrared film)、カラーフィルムへの応用化が図られればその情報量はさらに増大するものと考えられる。そしてカラーフィルムの場合はColor data systemの一環として、リバーサルカラー(Reversal color film)、フォルスカラー(False color film)、デジタルカラー(Digital color)等が森林あるいは森林以外の各分野における濃度解析、情報分析の手法としてその対応性ととも利用化が期待される。<sup>24)27)68)78)79)105)</sup>とくにデジタルカラーは色調または濃度パターンの12色分割標示方式による写真濃度(情報)のシンプル化または細分化システムが可能である点で、濃度計測への導入と実用化に対する今後の研究課題の一つであるといえよう。<sup>33)93)94)</sup>

また現行の濃度計測は単一写真に対する濃度解析を基本とする、いわゆる1次元の情報処理にとどまっているが、将来は装置のY送りカムの作動その他による2次元化、および前節(§6-2)による濃度波形の基本的解明の問題とあわせ、立体像の濃度計測にもとづく3次元化が指向されるべきであろう。<sup>76)77)83)111)</sup>

さらに経年写真、すなわち一定間隔年毎に撮影された空中写真を使用することにより材積生長量の推定をはじめ各種測定地域の変化の状態や度合い等の把握、たとえば林木、樹冠、植生等の遷移にともなう森林の変動状態、地肌、地表層等の地形の変化にもとづく予防治山、河川の流動変化、海岸線の侵蝕状態、農地、住宅、都市、工場群等の変化の状態

や度合い、変動予測等は正確かつスピーディに把握されるであろう。そしてこれに加えて前述のカラーフィルムの適正な利用化が図られれば、その情報は量的にもまた質的にもさらに向上するものと期待される。<sup>6)22)116)</sup>

なお、最近における新しい技術的手法としてリモート・センシング (Remote sensing) が大きくクローズアップされている。これは人工衛星や航空機などを利用し、遠く離れたところから地球上の各種の変化の状態を探查する技術のことをいい、ERTS計画を契機に飛躍的な技術開発の発展とともに注目されつつあるテクノロジーである。

すなわちアメリカ航空宇宙局 (NASA) が内務省との協力のもとに、1980年までに地球全地域表面の反覆観測を行なうことを目的に実用衛星 EROS (Earth Resources Observation Satellite) を打ち上げる計画をすすめている。そしてその前段階としての実験衛星 ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite-1) が1972年7月23日打ち上げられ、同7月25日から実験の観測活動を開始している。その目的は食糧・水・大気・森林・土地・エネルギー等の資源問題および汚染化がすすむ環境問題を全地球的視点に立って観測・チェックし、その有効管理と保全対策を指向しようとするものであり、その映像データは、①高度912kmの円軌道 (軌道傾斜角99°) 上にあり極地方の一部を除く地球全表面が反覆観測される、②その反覆期間は18日で同一地域が常に同じ時間 (地方時) に観測される、③1枚の中に185km×185km=34225 km<sup>2</sup> の範囲を含む映像 (面的表示) データがキャッチされる、④同一地域について4つの異なった波長領域のデータが同時にえられる、⑤地上分解能が70m~80mときわめて高く20万分の1地図に相当する地図情報がえられる、等の実験的成果が指挙されている。そしてさらに ERTS-1のあと、1973年には Sky Lab (高度435 km, 軌道傾斜角55°, 反覆期間5日) が打ち上げられ、また1975年には ERTS-2の打ち上げが計画されており、これらの各映像データは共同研究の形で全世界の研究者に提供される仕組みになっている。

これら一連の実験衛星は、たとえば ERTS-1の映像がもつ豊富な情報量や高い精度等の特性を有するものの、その実用化に対してはユーザー (User) やグラウンド・トゥース (Ground truth), センサー (Senser) 等の問題を含め、映像判読や情報解析に対しなお多くの研究課題を擁している。しかしこれらの諸問題の解決化が図られれば、宇宙観測記録から地上記録までの、いわゆるリモート・センシング→中高度航空機による空中写真計測→地上 (現地) 調査、の一貫した体系における将来の調査・計測システムとして、森林や環境等に対するモニターリング (Monitoring) の課題とあわせ、その情報量はさらに無限に提供されることになるだろう。