九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

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：

図等に白水善子，井上綾子，常岡雅美，松尾和幸，安川和子の各氏にそれぞれご協力をいただいた。とくに後半の写真濃度波形グラフの読みとり・計測および各種計算に松尾和幸，安川和子両氏，電算機プログラムの作製に常岡雅美氏のご協力をいただいた。その他直接間接にご指導，ご協力をいただいた先学者各位，九州大学森林経理学教室，同演習林研究部，同調査部の関係者各位とともにここに記し深甚の謝意を表する次第である。

また，本実験研究のための各種現地調査に際し，熊本営林局計画課，同えびの，矢部，都城，小林，玖珠，八代，大分各営林署，前橋営林局山口営林署（福島県），農林省宮崎種畜牧場，佐賀県背振村，九州林産株式会社湯布院事務所，大分県日田市事務所林務課，熊本県および宮崎県各林務部，九州大学粕屋，宮崎，早良各演習林等，なかんずく本研究調査のためその後半の殆どを調査対象地として利用したえびの営林署歴代署長，同白鳥製品事業所歴代主任，同中摩エイ氏らに種々の便宜とご援助をいただいた。あわせて関係者位に対し心からの謝意を表する次第である。

なお本研究はその一部を熊本営林局委託調査費（昭和33～36年度，空中写真による材積推定の研究），文部省科学研究助成金各個研究（同36～38年度，空中写真による材積推定に関する研究），同試験研究（同41～42年度，空中写真濃度測定による蓄積推定の研究），同一般研究C（同45～46年度，森林蓄積計測の自動化に関する研究）（以上いずれも代表者，九州大学，木梨謙吉教授），同総合研究（同43～45年度，未開発林の調査と評価法に関する総合的研究，代表者，宇都宮大学，近藤正巳教授），および同奨励研究A（同46年度，空中写真における等濃度レベルおよび波形面積と樹種，年齢別材積に関する研究）等の各研究費によったものである。

また回帰の分析検討のための計算ならびに空中写真濃度の自動計測化システムに関連した諸計算は，その一部を九州大学演習林研究部の小型電子計算機 OLIVETTI PROGRAMMA-101，および九州大学大型計算機センターの FACOM 230-60 FORTRAN を利用した。

第1章　空中写真の濃度と森林蓄積および Interpretation との関係

§1—1　Interpretation による森林蓄積の推定とその問題点

1．Interpretation による森林蓄積推定の概要

1)　空中写真材積式の種類とその調製

森林または林分に対し全数（毎木）調査，標準地調査，あるいはサンプリング等により蓄積推定を行なう場合，胸高直径，樹高等の各測定要因に対する測定精度，プロット抽出個数，プロットサイズ等の調査方法とともに立木幹材材積式はきわめて重要な役割を有すると同様に，Interpretation すなわち空中写真の像の判読測定によって森林または林分の蓄積推定を行なう場合にも空中写真材積式が重要な役割を有する。そして立木幹材材積式の種類，調製方法等が数多くあると同じように空中写真材積式についても多くの種類とその調製方法を有する。[23) 35) 44) 67) 70) 73) 97) 103) 107) 108) 113) 117)]

すなわちその種類，したがってそれに伴う各種の調製方法は，空中写真による蓄積推定の方法，目的，あるいは写真の種類，調査の功程等にもとづく推定精度に大きく関連する。たとえばきわめてマクロな蓄積推定を行なう場合には林分としての材積式，それも独立変

数の項ができるだけ少ない材積式が使用の面で効率的であり，またそれで推定の目的は一応達せられるであろう。しかし逆に一定の推定精度が要求される場合，あるいは単木別，径級別または樹種や本数等の要因を加味した詳細な蓄積その他の林木構成因子の把握を必要とする場合には単木材積式の適用が望ましく，その独立変数も空中写真上判読可能の限り有効な要因を用いることが精度の面からも有効かつ適切であると考える。

しかし一般的には空中写真による蓄積推定は，対応する各種の地上調査とは本質的に異なり，4000mないし6000mの高度から光学的システムと理化学的材料によって撮影・記録された空中写真という媒体物により判読測定される，いわゆる間接測定であることから必然的にその推定精度に限界を有することは，地上調査にもとづく蓄積推定の場合と大きくその条件を異にするゆえんと理解すべきであろう。

ともあれ，調査および判読測定方法，使用目的等に関連する蓄積推定の精度の面から，空中写真の判読測定による森林蓄積推定のための空中写真材積式は大きくは単木材積式と林分材積式の2つの材積式に大別され，そしてその中で下記の2種類，合計4種類に細分される。

A　単木材積式
　1)　単木材積式
　2)　平均単木材積式
B　林分材積式
　1)　林分材積式
　2)　平均林分材積式

上記の各材積式はその調査方法，利用目的，あるいは空中写真の種類，森林または林分の構成状態等によってその利用形態は大きく異なってくる。したがって材積式における回帰の誘導および計算のためのデータのとり方や材積式の要因構成，ひいてはそれにもとづく推定精度等もそれぞれに変化する。

いま，Interpretationによる森林蓄積の推定に関する以上の基本的理念，ならびにそれにもとづく各種の条件をベースにして，九州における各種森林およびスギ，ヒノキ，マツ，広葉樹等の主要樹種を対象にその調製を行なった空中写真材積式について，これを各判読測定要因にもとづき重回帰式により示すと次のとおりである。

すなわち空中写真の判読測定要因，つまり独立変数としては

CD　：　樹冠直径
H　：　樹　　高
N　：　本　　数
CC　：　樹冠疎密度
$\overline{CD}$　：　平均樹冠直径
$\overline{H}$　：　平均樹高
$\overline{CC}$　：　平均樹冠疎密度

等がある。これらは単一独立変数としての効果，すなわち有意性を示す場合と，各独立変数の交互作用，つまり判読測定要因間の掛け合せにより効果を示す場合がある。[11)a,b,c,42)a,b,44)51)a,b]

これより，対応する材積 V を従属変数とする重回帰式はたとえば一般式の型としては

① CD のみによる場合

$$V = b_0 + b_1 CD$$

② CD, H による場合

$$V = b_0 + b_1 CD + b_2 H + b_3 CD \cdot H$$

③ CD, H, N による場合

$$V = b_0 + b_1 CD + b_2 H + b_3 N + b_4 CD \cdot H$$

等となる。計算の都合上，各独立変数を

CD …… x_1
H …… x_2
N …… x_3
⋮　　⋮

とし，また従属変数 V を Y とおきかえれば上記の重回帰式はそれぞれ

① $Y = b_0 + b_1 x_1$

② $Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 \cdot x_2$

③ $Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1 \cdot x_2$

等によってあらわすことができる。そして重回帰係数 b_i は実測値（y）と推定値（Y）の差の二乗の和が最小になるよう，すなわち

① $\sum^{k} [(y - b_0 - b_1 x_1)^2] \longrightarrow \min$

② $\sum^{k} [(y - b_0 - b_1 x_1 - b_2 x_2 - b_3 x_1 \cdot x_2)^2] \longrightarrow \min$

③ $\sum^{k} [(y - b_0 - b_1 x_1 - b_2 x_2 - b_3 x_3 - b_4 x_1 \cdot x_2)^2] \longrightarrow \min$

になるよう最小二乗法計算により求めたものである。[20)39)110)] なお k は k 本の林木本数または k 個のプロット個数をあらわす。

以上の重回帰式①，②，③は一般式の型によりその一部を例示したものであるが，実際には前掲の各判読測定要因に対し効果の有意性検定のもとに各種の判読測定要因つまり独立変数の組合せが可能である。

これにより九州における各種森林およびスギ，ヒノキ，マツ，広葉樹等の主要樹種その他を対象に材積式の調製と現地チェックにもとづく精度の検討等を行なった。

2) 森林蓄積の推定とその精度

重回帰式による前項 1) の空中写真材積式はこのあといずれも調査林分または森林に対する現地チェックにより材積式の精度の検定を行ない，実際の森林等に対する対応度，すなわち相関係数その他の各種分析検討のもとにその実用性が確かめられた。したがって森林蓄積の推定はこれらにより各回帰式における独立変数つまり CD や H, N, CC, あるいはそれらの平均値等が空中写真上において Interpretation され，単木毎またはプロットサイズ当り，あるいは林分（ha）当りの各材積がその分散ならびに標準誤差等とともに計算され，これにもとづいて単位面積当りまたは調査対象全面積当りの蓄積が推定されることになる。

なおこれらの森林蓄積推定の精度はその標準誤差率において平均的には10～15%（高精

度の場合で5～10%以下，最低の場合23.1%）の精度を示しており，森林蓄積推定の精度としてはその調査システムとあわせ十分に実用性を有するものと認められる。

一方，その調査功程はサンプリングにもとづく各種現地調査に対し，Interpretation による場合はこれに現地チェック等の作業時間を加味しても20%前後に止まり，またコストの面でも First sample, Second sample 等の関連経費を含め調査全経費の30%ないし40%以内におさまることから，Interpretation による森林蓄積推定法はきわめて効率的な森林調査システムであると評価される。[11) a,b,c,41) a,b,c,42) a,b,43) 44) 45) 48) 49)]

2．Interpretation による森林蓄積推定の問題点

全数調査，標準地調査，あるいは各種のサンプリング調査等の現地調査システムと対比した場合，Interpretation による森林調査はその調査功程，コストその他の面で優れた多くの利点を有する。とくに一時点において広面積の森林が撮影・記録される空中写真は，その写真像の中に無限の情報（データ）が内蔵され，目的と必要に応じてこれらが適宜利用しうるという点できわめて優れた方法であるといえる。

しかしその中でこれを蓄積推定に限定して，蓄積との対応性を有する各種の主要判読測定要因を Interpretation によって測定する場合にはいくつかの欠点をもあわせ有する。

その第1点は重回帰による空中写真材積式においてもっとも効果の高い，つまり有意性を示す判読測定要因の一つである樹高（H）の測定が空中写真ではきわめて困難な判読測定作業の一つとなっていることである。樹高の測定は主として反射式実体鏡による視差測定稈（Parallax bar）または視差楔（Parallax wedge）を用いて行なう。たとえば視差測定稈による場合，その算出樹高 Δh は

$$\Delta h = \frac{H_j \cdot \Delta p}{b+\Delta p} \fallingdotseq \frac{H_j \cdot \Delta p}{b}$$

ただし H_j ：測定地点 j の撮影高度

b ：空中写真基線長

Δp ：視差差

による。この中で Δp は測定対象林木の頂点 h_T と同地際 h_L の視差差を示す。そのため完全な鬱閉状態を呈する森林，あるいは鬱閉度は不完全でも林木の地際 h_L の視差測定ができない森林では理論的にその Δp は求められない。したがって Δp の測定はわずかな間隙地や空地，林縁等を利用しその周辺または隣接木について測定するという手法によるためきわめて高度の技術と熟練および経験を必要とする。そのため樹高については地上調査データにもとづく樹冠直径（CD）と樹高との回帰関係を応用したり，高低測量と結びつけた樹高測定法，または地上調査データからの平均樹高 $\overline{H}$ による方法やはじめから樹高を回帰の項からはずして材積式の調製を行なうという方法によってその解決を図っている状態である。[4) 9) 29) 35) 37) 50) 70) 73) 86) 107) 108) 113)]

第2点は主要判読要因（CD, H, N, CC 等）の各独立変数に対して行なう写真上の判読測定値が判読者のちがいによって異なることである。これらの判読測定要因に対しては各種の判読スケール，たとえば CD に対しては樹冠直径測定板（Diameter scale），楔尺板（Wedge scale）等により，H に対しては前記の視差測定稈，視差楔等により，また CC は樹冠疎密度板（Crown density scale）その他により，それぞれ拡大実体鏡による実体視

下のもとに測定が行なわれるが，ここでも判読者の熟練度がスケールの読みのちがいとあいまって判読測定作業の功程（能率）に大きく影響し，また誤差要因の一つとなってあらわれてくる。ちなみに空中写真の判読測定に対する経験者と初心者，つまり未経験者とをとりまぜた A，B，C，D の4人について同一個所の判読測定結果に対する3回繰り返し平均値の有意性の F-検定を試みた結果では，経験者と未経験者とでは5％レベルでの有意差を示した。また経験を有する同一人について，時点をずらして行なった判読測定値の変動性に対するチェックの結果でも，有意差は示さなかったが個々の測定値については若干の相違が見受けられた。これらの結果から判読測定要因に対する測定値の普遍性は認め難いといえる。[48]

第3点は空中写真上に設定されるプロットサイズの大小に伴い蓄積推定の精度も変動することである。この問題については53年生スギ林分に対し0.01ha，0.05ha，および0.09haの3種類のプロットサイズを設定し，各プロットサイズ x に対する誤差率 y の回帰を判読者A，B，Cの3人の平均値により求めた結果

$$Y = \bar{y} + b(x - \bar{x})$$
$$= 4.0533 - 0.3417(x - 5.00)$$

をえた。すなわち各プロットサイズにもとづく精度は誤差率にしてプロットサイズ0.01haに対し0.05haでは1/3，0.09haでは1/2の減少を示し，その減少量は直線性となった。これによりプロットサイズが大きくなれば蓄積推定精度がよくなることがわかる。一方判読測定作業の面では大型プロットは功程上は有利とはいえない。なお，空中写真の引伸率2.5倍と5.0倍による蓄積推定精度の比較検定の結果は両者間にその差異は認められず，ただ5.0倍の場合が判読測定が容易であるという利点からわずかながらの功程上の有利性がうかがわれた。[48)49)]

第4点は空中写真による森林蓄積推定は将来自動計測化が指向されるべきであり，したがってそのためのシステムの究明と確立化が図られるべきであると考える。しかし Interpretation にもとづく手法では以上の結果すなわち各問題点とあわせ自動計測化に対しては限度がある。とくに各判読測定要因に対する測定者間の変動性は，観測・測定値に対する客観性，科学性，再現性および普遍性等がもっとも重要な条件となることから，自動計測化システムに対する大きな障害の一つといえる。したがって Interpretation による場合，いわゆる人為的な依存度が作用することから，それによってえられるもの，たとえば経験や熟練度，思考力，判断力等の有する優位性はともかく，自動計測化という点では必然的にその限界を招致する結果となる。[13)a,17)57)a]

以上に述べた各問題点の解決，なかんずく測定値の普遍化とそのスピード化，推定精度の向上ならびに自動計測化システムへの指向化等から，従来の Interpretation に代る新しい計測システムの一つとして，とくに自動計測化に主眼をおき，その測定が光学的計測機器によって可能な要因として空中写真の各被写体つまり写真像の濃度に着目し，これと森林蓄積との関係に対する基本的法則性および濃度要因中の各計測因子と森林計測要因との関連性ならびにそれぞれの相関関係等の解析と究明のための各種の実験研究と分析検討を以下に試みた。

§1—2　森林空中写真の濃度要因とその計測および Interpretation との関係

空中写真を媒体物とする森林蓄積の計測において主として Interpretation による場合，空中写真における被写体 つまり森林または林分に対してはその像の形状，大きさ，色調，構成，陰影，配列その他の各種現象因子，ならびにこれらの対象地域における現地(地上)調査および既知のデータが加味された総合的な判読測定が行なわれ，その関係は

$$\underbrace{\left(\begin{array}{l}\text{像の形状・大きさ}\\ \text{色　　調}\\ \text{構　　成}\\ \text{陰　　影}\\ \text{配　　列等}\end{array}\right) + \left(\begin{array}{l}\text{対象地域における}\\ \text{現地（地上）調査}\\ \text{および既知のデータ}\end{array}\right)}_{\text{総合的判断}}$$

となる。[4)9)23)35)97)100)107)108)113)]

これに対し 濃度計測の場合の計測要因は 上記の Interpretation による場合と同様に空中写真を媒体物とする被写体（森林または林分等）がその対象となるが，これと関連して濃度計測装置における各計測ゲージの機能がプラスされ，およそ次の計測要因が考えられる。[13)a,34)53)a,70)72)74)95)a]

〔Ⅰ〕 被写体—森林等—に対する要因

各樹種における像の形状，大きさ
各樹種における色調の変化（コントラスト）
山の形状，標高，傾斜度，傾斜方向
太陽光線の方向（向日面，背日面等）
森林の位置（峯筋，谷筋等）
樹齢または齢階
写真撮影の時期，時間，天候，方法等
感光材料，露出条件
写真現象焼付引伸処理条件

等々

〔Ⅱ〕 計測装置の各ゲージの機能

濃度のレベルに関連するゲージ
（主として写真濃度の透過光量または反射光量の調整）
本体のスリット幅，感度切替倍率レンジ，レンズ絞り，フィルター
直流増幅器の感度切替倍率レンジ
記録計の入力電圧レンジ
濃度の波形（形状）に関連するゲージ
本体の資料送り速度（x 方向）
記録計のチャートスピード

等々

空中写真の濃度計測の場合，以上の〔Ⅰ〕，〔Ⅱ〕は相互に密接な関連を有する。とくに計測装置の各ゲージの機能は被写体に対する各計測要因と関連して空中写真濃度の計測結

果すなわち写真濃度のレベル，形状等の要因に対する数量化システムの一環としての重要な要素となる。したがってこれらの各ゲージの機能に対するテストつまり森林空中写真の濃度計測にもとづく蓄積推定のための濃度計測装置の基礎的実験は，関連する自動計測化システムのための各種の装置とあわせ第2章において詳細に試みた。

§1—3　森林空中写真濃度計測システムに対する理論の提起

1．森林濃度計測システムの概要[13)a,71)]

いわゆる空中写真の像は白から黒にいたる濃淡色調のコントラスト，あるいはそれに色彩がプラスされた状態で構成される。そしてその被写体はそれぞれに異なる反射光量と波長差をもち，これが光学的システムと理・化学的感光材料等によって正確に空中写真上に再現されたものである。空中写真の濃度の計測はこの像のコントラストの量の測定とその構成諸因子の機械的・光学的・客観的観察およびそれらの解析を目的として行なう光学的計測システムの一つである。

すなわち，空中写真の像を写真濃度測定装置のホトマル受光部によってスキャンニング(Scanning) し，その透過光量または反射光量を電圧量に変換し，直流増幅器を経て記録計によりその濃度波形グラフを記録紙上にえがかせ，同時にその計測目的に応じて写真濃度測定装置と直結・組合わされた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により各濃度計測値を読みとり，それらの分析検討等の解析を数量的に行なうシステムである。

なお同波形グラフにおいて各ピークが個数すなわち林木の樹冠本数と，1周期における振幅つまり波形の基部幅が走査計測部分の樹冠直径と，各波形の上限および下限の濃度の値がその森林または樹種等の濃度レベルと，また波形グラフの側断面が対応する走査計測部分における林分側断面 (Stand profiles) とそれぞれ対応しているという視点にもとづいて森林または林分，林木等の蓄積その他の関係を各種の実験と計測および分析検討等の解析により究明し，各濃度要因の計測値にもとづいて森林蓄積の推定に結びつけようとするものである。

2．濃度と材積の関係に対する予備テスト[53)a]

森林を被写体とする空中写真の像は濃淡色調のコントラストがそのベースとなり，これに各種の計測要因すなわち大きさや形状等がプラスされて構成されるという以上の濃度要因とこれに対する濃度計測システムにもとづき，この中でとくにそのベースとなる濃度が材積とどのように関係しているか，つまり濃度と材積の間にどの程度の相関関係を有するかについてスギ，ヒノキを対象に色調板による予備テストを試みた。

予備テストは九州大学粕屋演習林新建および新谷団地のスギ，ヒノキ林分，面積 438.0 haを対象に，対応する空中写真*) の濃度と色調板 (Photo tone scale) を使用し，肉眼による比較観測により行なった。

その結果は濃度つまり空中写真上で観測される色調度はいくつかの要因によって構成されることから，そのパーセントにもとづく色調度のみでは材積との対応性は認められなか

*) 空中写真は1963年10月8日九州大学演習林撮影，撮影高度 2020 m，同縮尺 1：10000，広角写真 (RMK カメラ，レンズ焦点距離 $f = 152.67$mm) にもとづく写真 No. 184，No. 185の2.0倍引伸写真によった。

った。また林木の位置が峯筋，谷筋等による相違，太陽光線に対する向日面，背日面による相違等の条件によってそれぞれに観測色調度は変動することから，これらにもとづく濃度要因の分解すなわち各濃度要因における相違度の傾向とその度合い等に対する分析検討が必要と認められた。

したがって対象林分に対する色調度の比較検討を，まず峯筋，谷筋の位置要因および太陽光線の受光角（向日面，背日面）の両者について試みたところ，それぞれ表1－1および表1－2に示す観測結果をえた。また，スギ，ヒノキ林分を主対象に，その他ヒノキ・マツ・広葉樹が混交する林分をも含めた樹種別色調度の観測結果は表1－3のとおりとなった。

表1－1　位置要因別観測プロット色調度

Table 1-1 Observed photo tone of plot in each position

位置要因 Position	観測プロット色調度 Photo tone of observed plot						平均 Mean
峯筋 Peak part	40	45	30	35	35	35	37.0
谷筋 Valley part	50	50	55	65	60	65	57.5

表1－2　受光角別観測プロット色調度

Table1-2 Observed photo tone of plot in each angle of sun-light

受光角 Angle of sun-light	観測プロット色調度 Photo tone of obsorved plot				平均 Mean
向日面 Front	35	35	30	40	35.0
背日面 Reverse	60	70	55	55	60.0

表1－3　樹種別観測プロット色調度

Table 1-3 Observed photo tone of plot in each species

樹種 Species	観測プロット色調度 Photo tone of observed plot				平均 Mean
スギ *Cryptomeria*	60	65	70	70	66.25
ヒノキ *Chamaecyparis*	35	35	50	55	43.75
ヒノキ・マツ・広葉樹混交林 Mixing with *Chamaecyparis*, *Pinus* and broadleaved	30	30	35	35	32.50

いま，これらの各観測結果に対する分析検討を t－検定ならびに F－検定により試みたところそれぞれ次の結果をえた。

（i）峯筋・谷筋別平均色調度の差の t－検定

表1－1において峯筋の色調度を x_1，同谷筋の色調度を x_2 とすればその t－検定は次のようになる。

$$\sum x_1 = 220$$
$$\bar{x}_1 = 37.0$$
$$\sum x_1^2 = 8200$$
$$\sum x_2 = 345$$
$$\bar{x}_2 = 57.5$$
$$\sum x_2^2 = 20075$$
$$d = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| = |37.0-57.5| = 20.5$$
$$s_1^2 = \frac{\sum x_1^2 - \bar{x}_1 \cdot \sum x_1}{n_1 - 1} = \frac{8200-37.0\times 220}{6-1} = 12.0$$
$$s_2^2 = \frac{\sum x_2^2 - \bar{x}_2 \cdot \sum x_2}{n_2 - 1} = \frac{20075-57.5\times 345}{6-1} = 47.5$$
$$s_d = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} = \sqrt{\frac{12.0}{6} + \frac{47.5}{6}} = 3.149$$
$$t_{.01} = \frac{d}{s_d} = \frac{20.5}{3.149} = 6.510^{**}$$

(ただし df : $2(n-1)=10$ における $t_{.01}=3.169$)

(ii) 太陽光線に対する受光角別色調度の t-検定

表1-2 における向日面の色調度を x_1, 背日面の色調度を x_2 としたときその t-検定は次のようになる。

$$\sum x_1 = 140$$
$$\bar{x}_1 = 35.0$$
$$\sum x_1^2 = 4950$$
$$\sum x_2 = 240$$
$$\bar{x}_2 = 60.0$$
$$\sum x_2^2 = 14550$$
$$d = |35.0-60.0| = 25.0$$
$$s_1^2 = \frac{4950-35.0\times 140}{4-1} = 16.7$$
$$s_2^2 = \frac{14550-60.0\times 240}{4-1} = 50.0$$
$$s_d = \sqrt{\frac{16.7}{4} + \frac{50.0}{4}} = 4.084$$
$$t_{.01} = \frac{d}{s_d} = \frac{25.0}{4.084} = 6.121^{**}$$

(ただし df : $2(n-1)=6$ における $t_{.01}=3.707$)

(iii) 樹種別色調度の F-検定

表1-3にもとづき各色調度がスギ，ヒノキ，およびヒノキ・マツ・広葉樹混交林の各樹種間にどの程度の相違を有するかの検定を分散分析により試みたところ表1-4の結果

をえた。

表1-4 樹種別観測色調度の分散分析
Table 1-4 Analysis of variance of observed photo tone in each species

Source	*SS*	*DF*	*MS*	*F*
Species	2363	2	1181.5	25.80**
Error	412	9	45.8	
Total	2775	11		

色調度の各要因別観測結果に対する以上の検定結果から，峯筋,谷筋の位置要因の場合，一般にヒノキ，マツ，広葉樹等の明るい濃度を示す樹種が峯筋に，反対に暗い濃度を示すスギが谷筋に位置することが多く，テストの対象とした本林分でも同様の状態を呈することから，峯筋は谷筋に比較して明るくあらわれており，その平均値の差(絶対値) $d=20.5$ は自由度 (df) 10 で $t_{.01}=6.510$ となり著しく有意となった。

また峯筋，谷筋に関係なく太陽光線の受光角の相違，つまり向日面と背日面の場合，向日面はそれがどこに位置しても明るく，逆に背日面では平均して暗い濃度を示すのが通例であるが，ヒノキをその主対象とした本林分の検定結果でもその平均値の差(絶対値) $d=25.0$，自由度 (df) 6 で $t_{.01}=6.121$ となり高度の有意差を示した。

さらにスギ,ヒノキ,およびヒノキ・マツ・広葉樹混交林の各樹種に対する色調度の観測値にもとづく分散分析の結果でも樹種間にきわめて高度の有意性が認められた。すなわち各樹種間には固有の差異を有することが検定結果から指摘された。そしてその状態はスギの濃度がもっとも濃（暗）く，ついでヒノキの濃度がスギに比し若干明るくあらわれ，ヒノキ・マツ・広葉樹混交林の場合は一番明るいという特性を示している。

以上の各検定結果は森林空中写真の濃度の基本的特性をきわめて顕著にあらわしているといえる。すなわち太陽光線に対する受光角，スギ，ヒノキ，マツ等の樹種，峯筋，谷筋等の場所の相違およびそれらの交互作用が森林空中写真の濃度とよく対応している。しかしそれらの濃度だけでは簡単には材積との結びつきはみられない。したがって材積との対応関係について比較色調度による分析検討を以下に試みた。

すなわちスギ5，ヒノキ6の各プロットに対する観測色調度を C，その中で最高色調度を C_H，同最低色調度を C_L とし，プロット内の比較色調率 P を

$$P=\frac{C_H-C_L}{C}\times 100$$

によりそれぞれに求めた。表1-5はスギ，ヒノキ別プロット毎比較色調率 P と，対応するha当り材積 V (m^3) を一覧表に示したものである。

いま，表1-5において比較色調率 P を独立変数 x,対応する材積 V を従属変数 y とし，b_0, b_1 を回帰係数とすれば1次式の回帰

$$Y=b_0+b_1x$$

の成立が想定される。これによりスギおよびヒノキに対する各回帰計算のための最小二乗

表1-5　樹種別プロット毎比較色調率対ha当り材積

Table 1-5 Relation between volume per ha and photo tone percentage in each species

プロットNo. Plot No.	スギ *Cryptomeria*		ヒノキ *Chamaecyparis*	
	比較色調率 Tone percentage	ha当り材積(m³) Volume per ha	比較色調率 Tone percentage	ha当り材積(m³) Volume per ha
1	14	122	27	289
2	28	136	27	315
3	50	341	50	331
4	62	524	43	338
5	58	636	57	340
6	—	—	66	440

法計算ならびに分散分析を示すと，スギ：表1-6 (1), (2), ヒノキ：表1-7 (1), (2) のとおりである。

これより，スギ，ヒノキのそれぞれの回帰式および相関係数 r は

〔スギ〕

$$Y = -81.4327 + 10.2178\,x$$

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2\sum(y-\bar{y})^2}} = \frac{17360}{\sqrt{1699\times 209917}} = 0.919$$

表1-6　スギの回帰計算および分散分析

Table 1-6 Solution system of regression and analysis of variance in *Cryptomeria*

(1) 回帰計算組織解

(1) Solution system of regression

	1	x	y	$1+x+y$
1	5	212	1759	1976
x		10688	91942	102842
y			828733	922434
42.4		1699	17360	19059
351.8			209917	227277
10.2177752			32536	32536

(2) 分散分析

(2) Analysis of variance

Source	*SS*	*DF*	*MS*	*F*
Const.	618816	1	618816	57.06**
Reg. on x	177381	1	177381	16.36*
Error	32536	3	10845	
Total	828733	5		

表1-7 ヒノキの回帰計算および分散分析

Table 1-7 Solution system of regression and analysis of variance in *Chamaecyparis*

(1) 回帰計算組織解

(1) Solution system of regression

	1	x	y	$1+x+y$
1	6	270	2053	2329
x		13412	95812	109494
y			715751	813616
45.0		1262	3427	4689
342.2			13283	16710
2.7155309			3977	3977

(2) 分散分析

(2) Analysis of variance

Source	SS	DF	MS	F
Const.	702468	1	702468	706.71**
Reg. on x	9306	1	9306	9.36*
Error	3977	4	994	
Total	715751	6		

〔ヒノキ〕

$$Y = 219.9677 + 2.7155\,x$$

$$r = \frac{3427}{\sqrt{1262 \times 13283}} = 0.837$$

となり，資料数が非常に少ないにもかかわらず両者いずれの場合も高い相関関係を示し，比較色調率とha当り材積はよく対応していることが認められた。図1-1(1), (2)はこの関係をグラフに示したものである。

色調板による濃度（色調度）と材積その他の要因に対する以上の予備テストの各結果は，空中写真濃度計測の各種森林調査への応用，なかんずく材積推定への応用化の見通しとその可能性を示すものといえよう。

3．森林空中写真濃度計測の方式と理論

前項1，2における濃度計測システムの概要，および濃度と材積の関係に対する予備テストの結果，ならびに既往において実施した各種森林に対する森林調査，なかんずく空中写真による判読測定の成果，および写真濃度計測に対する本研究の初期段階に試みた各種の基礎実験等の経過と体験，成果等から誘導した，森林空中写真の濃度計測に対する若干の理論とその方式を主要計測要因について以下に提起する。

1) 樹種および林齢（齢階）と濃度レベルの関係について[13) b,c,d,e]

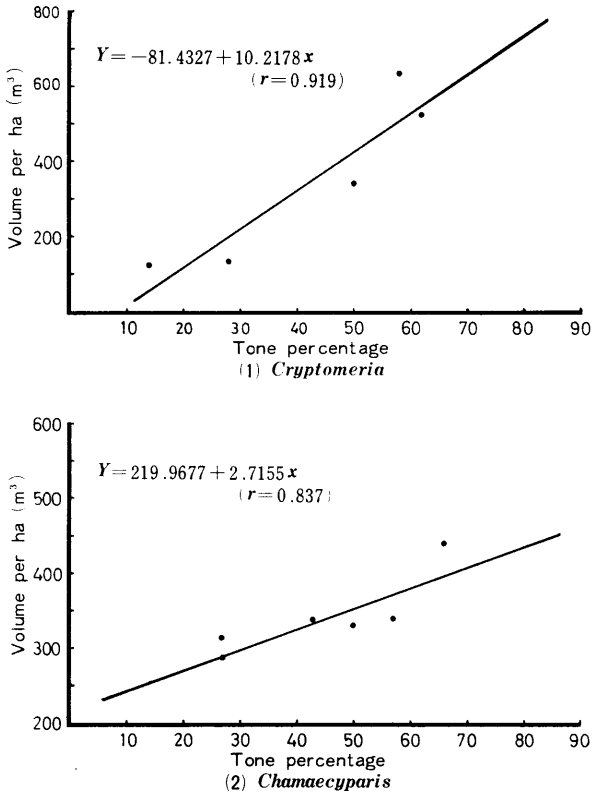

図1-1　比較色調率と ha 当り材積の回帰図

Fig. 1-1 Relation between volume per ha and tone percentage

いま，単数または複数の空中写真を手にしたとき，まず最初に人間の視力に認められるものは写真全体の濃淡色調のコントラストの変化であろう。すなわち森林を被写体とする空中写真ではその濃淡色調のコントラストの変化，つまり濃度が基本的ベースとなって各被写体の像の構成を示す。そしてそれらの像は被写体の有する性質を他の要因（大きさや形状等）とともに空中写真上に組合わされ再現されたものである。したがってこれらの像の濃度を逆に被写体（森林）に Feed back し分解していくと，そこには被写体のもつ特性が認められることになる。その中で濃度の示すもっとも顕著な特性としては森林空中写真の場合スギ，ヒノキ，マツ，広葉樹等の樹種であろう。すなわち各樹種はそれぞれに異なる反射光量と波長差を有する。光の波長は普通肉眼では 400～750$m\mu$ の範囲で感じる。この波長の幅内の光が可視スペクトルまたは可視光線といわれる。森林の場合，立木や地表植生あるいは物体等の色彩は太陽光線および空中よりの光線を反射し吸収する度合により異なり，その量と反射スペクトルの性質にはそれぞれ特有の変化をもっている。たとえば針葉樹（ツガ）と広葉樹（カエデ）の反射光はいずれも 550$m\mu$ 付近と赤外線部分でもっとも大きく，その反射量は 550$m\mu$ 付近では針葉樹 4.5%，広葉樹 12%でその差 7.5%となり，赤外線部分では針葉樹 18%，広葉樹 40%，その差 22% となる。また森林空中

写真の像の色調変化は可視スペクトルとともにその構成要因による反射光の量，たとえば年齢や生長度，樹型，葉の状態（形）等のちがいによっても変化が認められる。したがって写真像によりこの二つの樹種の判別を行なう場合は 550$m\mu$ 付近または赤外線部分がもっとも適していることになる。森林空中写真はこの目的を満足するフィルムの使用および撮影時期，時間，天候，フィルター等の撮影条件が配慮されて撮影されることが望まれる。しかしこれらに対する現象は実際の森林ならびに対応する空中写真上において肉眼によっても明確に観測されるところである。したがってまたこの現象は写真濃度測定装置によりスキャンニングさせた場合にも，濃度レベルという形できわめて正確に把握されうる。

スギ，ヒノキ，マツ，広葉樹等の各樹種および林齢または齢階と濃度レベルの関係については以上の理論にもとづき，その解析が可能であると考える。

2） 林木の本数と周波数または濃度波形のピーク数の関係について[13) d,e,f]

空中写真の濃度計測を森林蓄積の推定に適用する場合には直接間接の結びつきにもとづき各種の計測要因が考えられるが，その中で本数は基本的な計測要因の一つである。

森林空中写真の濃度は前項1）において述べたごとくその色調濃淡のコントラストの変化の状態がベースとなるが，これに加えて被写体である森林または林木が有する形状，大きさ等も重要な濃度構成要因となる。本項ではその中で形状が有する濃度としての性質を濃度レベルとともに林木本数に結びつけようとするものである。

すなわち森林または林分は単木の集大成群により成立する。そしてその状態は樹種や年齢，大きさ，密度等により複雑に変化する。これが空中写真上ではそれぞれの有する反射光量と波長差にもとづく結合体（像）としてある濃度レベルによって撮影・記録され再現される。これに太陽光線の受光角が作用して陰影部を形成する。したがって空中写真上ではその状態は濃度をベースとしながら，それぞれの形状，大きさ等が相互に結像作用を呈し単木毎に明確に観測される。

濃度計測による林木本数の計測はこの状態に対する微細部の各濃度の変化量，つまり濃度の濃淡に対する上下の変化量をユニバーサルカウンターによる周波数，すなわち直流電流における単位時間毎くりかえし振動数を1サイクルとして電子光学的システムで本数と結びつける方法，または同上の濃度変化の状態を記録計による記録紙上にえがかせてその上下のピーク数を直接読みとる方法の両者いずれかの方法により行なおうとするものである。

3） 樹冠直径と濃度波周期または濃度波形基部幅の関係について[16) a,b]

一般に単木材積値の大きい林木はその樹冠間隙つまり樹冠直径が大きく，したがってその濃度の差も大である。これに対し単木材積値の小さい林木では樹冠密度は高いが樹冠間隙（樹冠直径）が小さい。このことは上記2）における本数計測の場合とも表裏一体の理論をなし，また前項2の農度色調板による予備テストの結果からもうかがい知られるところである。したがって予備テストの結果では単木材積値の高いプロットでは比較色調率の値が高く，逆に単木材積値の小さいプロットではプロット内の濃淡の差つまり濃度のコントラストの変化量が少ないことからその比較色調率の値も低くあらわれている。空中写真濃度計測による森林蓄積または単木材積推定における主要計測要因の一つである樹冠直径の測定は以上の基本的理論と現象にもとづきこれを濃度波周期または濃度波形基部幅の計測

によっておさえようとするものである。

すなわちポジフィルムまたは印画写真上の林木樹冠像の濃度は写真濃度計測装置における光電子増倍管によって電圧に変換・増幅され入力信号（被測定信号）として周期計測装置であるユニバーサルカウンターに入る。ユニバーサルカウンターはその入力信号の1サイクル間つまり周期トリガの間だけタイムベーススイッチの作動により内部基準時間（パルス）の主ゲートが開き，その間に主ゲートを通過するパルス数を自動計測する。つまり1サイクル間のパルス数が電子工学的に写真像の樹冠直径の大小と対応することから，これをユニバーサルカウンターにより計測させようとするものである。なおこの現象は写真濃度測定装置に直結させた記録計の記録紙上にも波形グラフとしてえがかせることができる。したがってその濃度波形グラフの基部幅を測定することによっても空中写真像に対応する樹冠直径の計測が可能である。

4) 林分側断面（Stand profiles）と濃度波形側断面の関係について[7)13)g,53)d]

以上の各濃度計測要因すなわち樹種や林齢，本数，樹冠直径等はこれを蓄積と結びつける場合，その個々の要因を独立変数としてそのまま材積に対応させて推定を行なう場合と，有意性を有するいくつかの要因を組合せて重回帰式により行なう場合の二つの方法が考えられる。一般には1要因のみによる場合よりは複数の要因によった方がその推定精度は向上するのが常である。そしてこれらの要因は上記のほかに空中写真濃度計測上可能なものとして濃度レベルや樹冠疎密度等が考えられる。しかし徒らに要因の数をふやすことが必ずしも効果的だとはいい難い。なぜならば要因数が増加すればそれに伴って濃度計測作業量も増加し，そのあとの計算も繁雑化する。そうすれば濃度計測本来の特長である高能率性に相反する結果になりかねないし，また最終目標の一つでもある農度の自動計測化の面でも障害を招きかねないであろう。むしろ自動計測化の面では濃度計測要因を少なくし計測システムをシンプル化することが望まれる。

ここで，その自動計測化を志す場合の濃度要因の一つとして濃度波形側断面の計測による蓄積推定の方法が思考される。濃度波形側断面は理論的には林分側断面すなわち Stand profiles の原理にもとづくものである。

すなわち森林または林分の蓄積は直接要因としては胸高直径，樹高，本数あるいは樹冠量等の各要因の組合せ，つまり交互作用による集大成にもとづくものである。換言すれば各要因の集大成の結果が Stand profiles という形で一つの蓄積度（量）を呈しているといえる。空中写真濃度計測における濃度波形側断面はこのような地上における各要因の集大成の結果，つまり Stand profiles の現象を波形グラフ上に再現したものと考える。すなわち濃度波形のもつ成分はピーク数または周波数にもとづく本数，波形基部幅または濃度波周期にもとづく樹冠直径，濃度レベルおよび形状にもとづく樹種や年齢等の各種の濃度要因がすべてその中に内蔵されているといえる。したがってこれらの成分を個々に分解したものが一つ一つの各濃度要因であり，その計測手段が波形グラフによるか計測装置によるかの違いにほかならないと考えるゆえんである。ただしその状態は Stand profiles の場合は正の相関，すなわちそこに位置する材積量が小の場合は面積も小さく，大であれば面積も大きくなるのに対し，濃度波形側断面の場合には濃度をベースとするため各樹種や林齢等の示す濃淡色調のコントラストの変化の複雑性から樹種や林齢等によってはむし

ろ負の相関を呈することも予測される。しかし正負いずれの相関においてもそこに一定の傾向が認められる限り問題にはならない。

Stand profiles と濃度波形側断面の関係については以上の対応性と理論にもとづくものであり，これによって森林蓄積の推定ならびにその自動計測化システムが可能であるとの予測にたつものである。

4．空中写真濃度計測の特長と利用形態に対する指向性

1) 空中写真濃度計測上の特長

(1) 濃度計測システムの自動化の可能性[13) a,57) a,c,70) 71) 89)]

以上により理論的提起を試みた各種の濃度計測要因，すなわち樹種や林齢，林木本数，樹冠直径，林分側断面等に対してはいずれも空中写真の濃度要因との結びつきを有することから，写真濃度測定装置による計測の可能性が理論的に確かめられた。すなわち経験や熟練度，技術等の人為性に依存する要素を多分に有する Interpretation による場合の欠点や問題点は写真濃度測定装置の使用による濃度計測という手段で機械的に測定させることにより解決されうるものであり，とくに計測のスピード化と測定値の普遍化に期待されるところが大きい。そして写真濃度測定装置にユニバーサルカウンター，A-D コンバーターならびにデジタルタイマー，デジタルレコーダー等の各種計測装置の増設・組合せを行なうことにより，上記の各種濃度要因は自動計測化が可能となり，さらに他の計測装置の増設・組合せにより計測要因の増大とその自動化の可能性をあわせ有する。なおこれらの各計測値は空中写真と対応して濃度波形グラフおよび数値として自動的に記録され，その目的と必要に応じくりかえし利用されるという点で，従来の Interpretation と対比しきわめて優れた計測システムであると評価することができる。

(2) Sampling method との結びつき[40) 53) d,57) c,62) 63) 92)]

空中写真濃度の計測はただ単に森林蓄積推定のための各要因の計測のみにとどまらず空中写真上に記録され内蔵されている無限の情報をその目的と必要に応じて取捨選択し，光学的システムと工学的メカニズムによりひき出すことが可能な点でも大きな特長の一つということができる。そしてその中で森林空中写真に対するもっとも基本的な計測要因の一つとして森林と非森林別の計測・判定およびその質的解析，すなわち森林面積の推定およびその中での樹種別，林齢別等の内容に対する計測・判定が客観的かつ能率的に行なうことができる。そしてその方法，つまり計測・判定の方式は蓄積の推定とあわせサンプリングの手法を適用することが理論的にもまた手段としてももっとも適しているといえる。

たとえばある面積の地域を対象に蓄積の推定を行なう場合には，①森林と非森林の判定およびその中での森林面積の推定，②森林部分に対する濃度と蓄積の対応（相関）関係の把握 (First sample)，③その中から Second sample の抽出にもとづく回帰式の作製，④そして Second sample の中から Third sample の抽出による現地チェック，等のサンプリングが Double sampling または Triple sampling の手法にもとづいてきわめて理論的に実行される。すなわち濃度計測による森林蓄積の推定は Sampling method にもっとも適した Technical system の一つであるといえる。

なお，その場合森林蓄積推定における従来の調査はその殆どが面積を計測ユニットとし，その面積のうえにたって各種の計測とそれにもとづく量的把握や推定が行なわれてき

た。空中写真濃度計測の場合も最終的には面積がその推定の基準となるが，各種濃度要因に対する計測過程ではすべて時間を計測のユニットとする。すなわち現地森林または林分との対応のもとに行なわれる空中写真濃度の計測は写真農度測定装置にセットされた資料（ポジフィルムまたは印画写真）に対する x 送りの作動およびこれに関連して組合される速度用歯車によって自動的に移動しながら光源照射部または透過部分に対する濃度計測が行なわれる。一方これによって計測された濃度（この段階ではホトマル受光部により電圧に変化されている）は直流増幅器による増幅を経て各計測装置に入力信号として入る。その際これらに組合されたデジタルタイマーのタイムユニットにもとづき目的要因に対する各計測はそのタイムユニットに対応する計測値として示される。たとえば対象資料の x 送り 10mm/min，タイムユニット 20 sec にセットされたときの濃度波形側断面積 a は 1 分間 10mm に対応する資料の長さ（距離）のうち 20 秒ユニットに相当する部分である。そしてその a がユニバーサルカウンターの計数表示管に表示されることになる。したがって任意の時間ユニットに対応させるため，現地森林調査の際のデータは写真（資料）スケールの変動性とあわせ x 方向に対する距離の細分測定を必要とする。この計測ユニットの相違は従来の調査法とそのシステムを大きく異にするところである。

以上によりきわめて要約的にその提起を試みた主要計測要因に対する若干の理論とその計測システムおよび二，三の特長点等についてはそれぞれ第 2 章以下の各部分において実際の森林または林分を対象に，その都度理論に対する実証的展開を試みる。

2) 利用形態に対する今後の指向性

空中写真に対する理論的および技術的部門はその利用度の多方面にわたる増大化にともない今後さらに進歩をつづけるであろう。また電算機システムもその利用量の増大化および社会生活への普遍的導入化とあわせなお一層の開発が予想される。同様にして電子工学システムや各種の機械工学的メカニズムもさらにすすむであろうことは十分に予測されるところである。これらに関連し空中写真の濃度計測システムもさらにその理論的応用にもとづく利用化が期待される。

しかしこれらの科学技術の進歩発展は，一方で都市公害や海水汚染，ひいては光化学スモッグ等にみられる大気汚染等に対する環境保全の問題として人間性の喪失化とあわせて一大社会問題化の原因形成にもなっている。そしてこの現象は特定地域のみにとどまらず世界的にみられる傾向でもある。したがってこれらに対する解決策，対応策はすべての人類学者，社会学者および科学者の現時点における最大の研究課題となりつつある。このことはひとり林学林業部門に視点を向けた場合にもその変遷をたどりつつあることが明白にうかがわれるところである。

すなわち従来は単に林木の生産形態に主テーマがおかれ，その生産量や形質あるいは経済的成否の問題が中心的課題となり，森林本来の有する効用ならびに存在価値性に対してはややもすれば副次的にしか評価されなかったきらいを感じる。もちろん林業の本質からみれば木材生産という形態は否定できないことは当然の理であろう。しかし最近では治山，治水をはじめ環境保全，人間性の回復にともなうレクリエーションの場等による森林の公益性は，木材生産部門とあわせ，いわゆる森林の有する機能に対し多目的利用という形で再認識されつつあるといえる。

このような現代科学のテクノロジーと相対比して人間生活に対する自然の効用ならびに価値性が再認識され再評価されつつある現在，それが占める面積的比率からも，またそれが有する価値性からもきわめて大きい役割をもつ森林に対する科学者，なかんずくその中で林学者の果すべき責務は重大であるといえよう。

このような林学林業のあるべき今後の方向性とあいまって濃度計測の利用形態もまた多岐にまたがるものと思料される。しかしその利用形態はつねに人間生活にプラスされるものでなければならないと思考する。濃度計測の基本的原理はパターン認識にその基盤をおく。したがってその利用形態はパターン現象にもとづくすべての要因に対する応用が可能であると考える。すなわち森林の有無や状態および質（内容）的解析，森林の環境的効用性の把握をはじめ各種環境の把握と実態の分析，災害その他の各種現象に対する実態把握と解明のスピード化等々が指挙されよう。これらの中にあって，本研究は森林蓄積の推定という特定の部門をその対象としたが，しかしこの研究の基本的考え方は他の多くの森林調査，ひいては各種の環境調査等，空中写真による各種の調査を濃度計測システムによって可能にしようとするための礎石たらしめんことをその成果とあわせ指向するものである。

§1—4　空中写真濃度計測における研究の現状および成果の概要

空中写真の利用はその歴史の深さとあいまってきわめて広く，またその利用形態も多種多様にわたっている。したがってそれに伴う研究も多岐にわたってすすめられており，また現在もつづけられつつある。そしてその分野は地形測量，各種図化，都市計画，道路・鉄道・河川・架橋・トンネル・ダム・港湾の各計画，各種被害調査，地質調査，海洋調査，遺跡調査，干拓計画，農地整備計画等，また森林・林業部門においても林相・地形の判読，施業計画，経営計画，蓄積・生長量調査，造林・伐採・林道・架線（集・運材）各計画，砂防治山工事計画，等々枚挙にいとまがない。[80)81)87)88)]

このように空中写真に対する一般的な利用の現状にもかかわらず空中写真の濃度計測に関してはほとんどその研究および利用例を認めることができず，わずかにアメリカにおいて地質測定および土壌判読にその研究例をみるにとどまる。すなわち濃度計測に対する主なる応用および研究分野はきわめて限られた部門，理・工・医・光学の分野程度に過ぎず，しかもそれらは空中写真によるものではなくその殆どがレントゲン写真や顕微鏡写真，精密撮影写真等にもとづく各種材質調査や構造分析，地形解析ならびに病巣体等の精密判定等の研究および応用に供されているに過ぎない現状である。[9)24)26)27)68)116)]

しかし最近にいたりその計測の客観性と高能率性および計測結果の普遍性と数量化による電算機システムとの結びつきにもとづく自動計測化の可能性等の面から，海洋調査や大気調査，地形解析，地質調査，植生調査等の各分野において空中写真による濃度計測システムの導入化のための各種実験研究がすすめられつつある。しかしそれらの殆どがその端緒についたばかりである。

これらの中にあって林学・林業部門への空中写真濃度計測システムの導入化のための実験研究は，わが国においては1961年，中島によりそのシステムの紹介と森林調査に対する応用化が提称され，[70)] その後農林省林業試験場航測研究室のもとで各種森林調査に対する応用化のための実験研究が主として基礎的分析検討のもとに取りくまれつつ現在にいたっている。[71)72)74)75)95)a,b,c,d] しかし森林蓄積の推定を目的とした各種調査実験研究ならびに

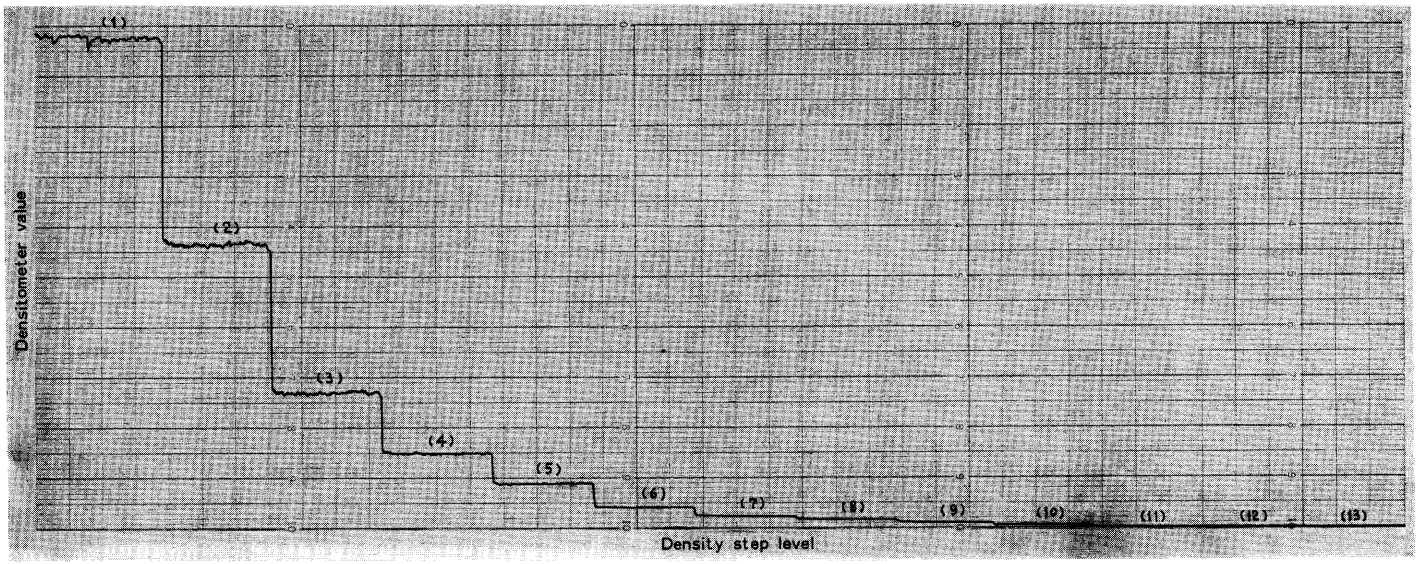

図 2-1 標準濃度片による濃度グラフ

Fig. 2-1 Graph of densitometer waves by density step tablet

その実用化に対する成果については九州大学における筆者らのほかは全くその研究例を認められない。なお，国外においては木材の理学的構造解析に関する研究例および赤外線フィルム，カラーフィルム等の特殊感光材料による病害木，虫害木の判定や生長状態の観測等が濃度計測によって実施されている報告例がアメリカ，オーストラリア等に認められるほか，蓄積推定に対する研究および成果等は他に見当らない現状である。[2)24)69)88)98)]

第2章　空中写真濃度計測装置に関する基礎的実験

§2—1　空中写真濃度計測装置の機構とその基礎実験

森林空中写真の濃度計測要因に対する各種の実験および計測ならびにそれらの分析検討はすべて光学的理論にもとづく写真濃度測定装置によって行なわれる。

いま，空中写真濃度計測システム（第1章，§1-3参照）にもとづき，本実験研究に使用したD250-1型写真濃度測定装置（株式会社応用電気研究所製）の機構および空中写真濃度計測のための基礎実験ならびに説明を試みると次のとおりである。

1．空中写真濃度計測装置の機構

写真濃度測定装置における基本装置は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5ブロックよりなる。

すなわち一定電圧に保たれた光源電源によって点燈された光源ランプから照射される光を集束レンズによって集束させ，セットした空中写真（ポジフィルムまたは印画紙写真）の計測部を透過または反射計測させる。この透過光または反射光は結像レンズで可変スリット（Slit）上に写真像を拡大結像する。なお計測部は可変スリットで2/100～1mmの任意のサイズ（ただし0.02mm間隔）に調整できるようになっており，これを上部集束レンズで集束してホトマル受光部に投射する。このホトマル受光部の出力は投射光量の大小をきわめて微細部の変化まで検出する。この出力つまり写真像の濃度のコントラストを電圧量に変換した出力はこれを直流増幅器により×10をベースとする略3倍率の増幅，すなわち×10，×30，×100，×300，×1000の5レンジにより適切な増幅を行ない記録計に連結する。これにより空中写真における写真像の濃淡（色調コントラスト）は0（白）から100（黒）の100レベルの範囲で記録紙上にその波形グラフをえがく。一方操作電源に連結された機構部はセットされた写真をX軸ならびにY軸方向に送り濃度計測の任意性が保たれる。[13)a]

2．空中写真濃度計測装置の基礎実験

1)　空中写真濃度波形の予備実験

空中写真濃度計測装置の基礎実験に先だち写真の濃度波形がD250-1型写真濃度測定装置によってどの程度，またどのような形状をもってあらわれるか，またそのあらわれ方は実際の写真濃度計測の場合に計測因子として使用されうるかどうか等の写真濃度計測に関する基礎データをうるため下記により写真濃度波形に対する予備実験を行なった。

(1)　標準濃度片による予備実験

予備実験はまず濃度が白＝透明(1)より黒(13)までの13レベルに区分された標準濃度片(Density step tablet, 富士フィルム社製，No. A-722，各種透過濃度計の較正に使用するもので，日本工業規格〈JIS K 7605〉または米国標準規格〈ASA PH 2.19-1959〉に規定されている視覚拡散光濃度Diffuse visual densityを厳密に測定できるよう製作され