HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	航空写真による樹種の識別に関する研究
Author(s)	高橋, 教夫; TAKAHASHI, Norio
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 36(1), 79-145
Issue Date	1979-03
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21002
Type	departmental bulletin paper
File Information	36(1)_P79-145.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

航空写真による樹種の識別に関する研究

高　橋　教　夫*

Studies on the Identification of Tree Species by Aerial Photographs

By

Norio TAKAHASHI*

目　　次

まえがき …… 80
I. 緒　　論 …… 81
1. 森林調査と航空写真 …… 81
2. 林分の分類と樹種の識別 …… 82
3. 樹種識別に関する従来の研究 …… 84
(1) モノクロームフィルムを利用したもの …… 85
(2) カラーフィルムを利用したもの …… 86
(3) マルチスペクトル画像を利用したもの …… 86
4. 研究の目的と方法 …… 87
II. 野外試験の方法 …… 90
1. 試験地の設定 …… 90
(1) 試験地の概況 …… 90
(2) マルチスペクトル写真の撮影 …… 90
(3) 供試木と供試プロットの選定 …… 95
2. 樹種識別に効果的な写真条件の判定 …… 99
(1) 識別効果を定量的に比較する方法 …… 99
(2) 写真色調の測定 …… 99
(3) 判別関数による樹種の判別と樹種識別に有効な波長帯域の組み合わせの判定 …… 102
(4) カラー写真の合成と識別効果の検証 …… 104
III. 樹種識別に効果の高い波長帯域 …… 107
1. 供試木・供試プロットの写真濃度 …… 107
(1) 撮影高度 500 m (縮尺 1:5,000) …… 107
(2) 撮影高度 1,000 m (縮尺 1:10,000) …… 109
(3) 撮影高度 2,000 m (縮尺 1:20,000) …… 109
2. マルチスペクトル写真による樹種識別の可能性 …… 111

1978 年 7 月 28 日受理

* 林業試験場経営部
Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Management Division.

3. 写真濃度による樹種の判別と樹種識別に効果的な
波長帯域の組み合わせ …… 112
(1) 撮影高度500 m (縮尺 1:5,000) …… 112
(2) 撮影高度1,000 m (縮尺 1:10,000) …… 115
(3) 撮影高度2,000 m (縮尺 1:20,000) …… 117
4. 撮影高度と樹種識別 …… 119
IV. 樹種識別に有効なカラーフィルムの種類 …… 123
1. カラー写真の合成と供試木・供試プロットの測色 …… 123
2. カラー写真間の樹種識別効果の比較 …… 125
V. 色調以外の要素を加えた写真判読の樹種識別の効果 …… 129
1. マルチスペクトル写真における色調と樹冠形，生育位置による識別 …… 129
2. カラー写真における色調と樹冠形，生育位置による識別 …… 132
VI. 結 論 …… 134
要 約 …… 138
引用および参考文献 …… 140
Summary …… 143

ま え が き

筆者は，北海道大学大学院に入学してからの短い期間ではあるが，天然林あるいはそれに近い森林の調査に従事して，その構造が多様であることに興味をもった。そしてこのような森林に対して適切な施業を行うためには，森林の構造を十分に把握しなければならないことを学んだ。一方，この現地調査が多くの労力を要するのを体験し，航空写真の利用によってより効率的な調査が可能になるのではないかと感じた。同時に，これまで航空写真が十分には利用されるに至らなかった原因について考えるようになった。

一般的に航空写真の判読はかなりの熟練を要するため，多くの林業技術者にとってはとかく敬遠されがちである。とりわけ，樹種の識別は高度の技能を必要としたため，この傾向が非常に強い。これを克服する方法として，コンピューターを利用した自動判読による樹種の識別が最近注目されている。しかし，これは精度的に十分なものとはいえず，さらに，これが現場と無関係なところで行われるため，林業技術者にとっては常に不安を伴うものである。

そこで筆者は，肉眼判読と自動判読を統一し，簡単な測定とそれほど熟練を要しない普遍性のある肉眼判読によって，これまで以上の精度で樹種識別を行うことのできる写真の条件を明らかにしたい考え，この研究を行った。

この論文を作成するにあたり，北海道大学農学部森林経理学講座の谷口信一教授，大金永治助教授には終始懇切なるご指導を，砂防工学講座の東三郎教授にはこの論文のご校閲をたまわった。農学部附属演習林森林測定部門の菱沼勇之助講師，板垣恒夫技官からは長年の共同研究を通じていろいろなご教示をいただいている。カラー画像の合成および測色については，千葉大学工学部天然色工学研究施設の江森康文教授，安田嘉純講師から有益なご助言をいただい

た。それとともに写真撮影については国際航業株式会社の西尾元充博士に，またカラー画像の合成については農林省北海道農業試験場草地第一研究室の高畑滋技官にご教示とご協力をいただいている。多量のデータ処理には北海道大学大型計算機センターを利用させていただいた。これらの方々に謹んで感謝の意を表するものである。なお本論文は「北海道大学審査学位論文」としてとりまとめたものである。

I. 緒　　論

1. 森林調査と航空写真

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い。これまでに莫大な量の航空写真が森林を対象に撮影されており，それらを使って多数の研究や調査が行われてきた。森林調査に航空写真を利用する利点についても多くの報告がなされている[30),41),48),67),71)]。

しかし，森林調査には，総括的な計画立案の資料収集を目的とするものと，個々の林地での施業の判定資料をえようとするものがあり，両者では要求される事項も精度も異なってくる[48)]。中山[50)]も森林調査を，森林資源調査を含む広義のものと，経営案編成のための狭義のものに分けて考えねばならないことを指摘している。

わが国で航空写真が森林調査に実際に利用され始めたのは，1930年以後であり，当時植民地であった樺太と満州の森林資源調査からである。航空写真は，植民地の広大な原生林を対象として，パルプ資源を中心とする森林資源調査に大きな効果を発揮した[28),53),76),81)]。だが，敗戦による植民地の喪失により，航空写真は，森林資源調査においてはその効果を発揮する場を失ったといえよう。というのは，国有林における経営案と民有林における森林計画が編成されることによって，その調査結果から必然的に全国の森林資源が把握できるからである。

一方，経営案編成のための森林調査においては，戦前では，植民地はもちろんのこと内地においても，航空写真の利用はなかったといえる[18),19),49)]。この分野で航空写真が利用されるようになるのは戦後のことである。

戦後の日本経済の復興とそれに続く高度成長は，木材需要を急激に増大させていった。しかも，パルプ化技術や各種合板の発達などにより，木材需要の状況も質的な要求から量的な要求に移行していく。このような変化は森林の取り扱いに影響を与え，質よりも絶対量の確保を目的とする大面積の皆伐作業が拡大されていった。それとともに森林調査も，量の把握に重点をおくようになる。そして保続単位の拡大によって大面積の森林を調査対象とするようになり，精度の把握が可能で，かつ能率的な蓄積推定法が求められたのである。そのため，標本調査法と航空写真の導入が図られ，航空写真による蓄積推定法として，航空写真材積表の作成[25),73)]や林相区分を利用した標本調査法[42),44),66),82)]，写真濃度測定の利用[8)]，多変量解析による材積スコア表の作成[47),77)]等が研究されてきた。

ところが，1970年代にはいって高度経済成長の矛盾としての環境破壊が顕在化し，大面積

の皆伐作業を中心とした従来の森林施業が批判をあびるようになった。このような中で航空写真の利用は，森林調査から環境調査に重心を移していくのである。これには赤外カラー写真やマルチスペクトル写真，衛星写真等の新しい技術の普及や開発が大きく寄与している。しかし森林調査からの逃避とも見えるこのような傾向をもたらした最大の要因は，森林調査における航空写真の利用がこれまで量の把握に偏向していたため，その限界を克服しようとして，質的なものを追求する新しい社会的情勢に無原則的に順応しようとしたことにある。

林業，林学に携わる者にとって，森林をどのように取り扱うかは最大の関心事であり課題であるが，これは航空写真の利用を考えるさいにも忘れてはならないことである。そこで，今後の森林施業と森林調査の在り方の中で，航空写真の利用について筆者の考えを述べてみたい。

森林を取り扱う場合には，まず働きかける対象としての自然を知らなければならない。その上でそれを取り巻く社会経済的条件を考慮し，計画的に施業することが必要である。筆者は森林調査を，森林の経営計画をたてるために必要な自然環境の認識として考えている。したがって，森林調査に航空写真を利用する本来の目的は，谷口もいうように「森林をより客観的に調べて，その知識にもとづく正しい施業法を導きだすことにある」[83]。

この観点に立つと，これまでの森林調査はきわめて量的側面に偏向していたといわざるをえない。とくに1960年代以降，高度経済成長による木材需要の増大を社会的背景とした増伐の方針が森林調査にも反映していたといえよう。森林を蓄積という1側面だけで捉える傾向が強くなり，数字によって森林が抽象化されてしまった。その蓄積がどのような内容，性質をもつものであるかという質的側面を無視したために，正しい自然環境の認識がなされないまま大面積の皆伐方式のようなきわめて画一的な施業法が拡大されていった。森林が地理的環境やその他様々な環境因子の影響を受けて複雑な様相を呈しているにもかかわらず，森林全体を蓄積という形で一括して一律に取り扱うことは非常に危険である。森林の構造に応じた多様な作業法を採用してこそ，森林を破壊することなく，持続的に木材生産を行うことができる。そのためには，森林調査による自然環境の認識を，質と量の面から統一的に深めてゆく必要がある。

2. 林分の分類と樹種の識別

従来の森林調査で捨象されがちであった質を認識する方法として，林分の分類が重要となってくる。従来林学では，林況がほぼ一様で施業上同一に取り扱う，すなわち施業の単位となる森林部分を林分と称してきた。この林分は自らの生長と森林施業によってその構造を変えるものである。逆に，林分の生長と施業の結果とは林分構造の変化に反映される[65]。したがって，これまでの施業の結果を照査し，今後の正しい施業方法を導き出すために，林分構造は重要な判断の基準となる。

そこで，林分構造を把握するためにはどうすればよいかが問題となってくる。大隅は，「林分のような自然社会の構造は，はじめから与えられているものではなく，ある一定の立場，視点においてこれを分析し類型化することによって認識さるべきものと考えられる」[65]といっている。

林分構造を把握する場合，森林全体としては1つの有機体として調和がとれているとしても，その中で矛盾し対立する異質な部分集団が存在する。したがってこれを林分として分類し全体の森林とその部分である林分を相互に関連させて捉える必要がある。このような分類にもとづかないで森林蓄積のみを求めることは，必然的に異質なものを一緒にしてしまうことになり，自然環境の認識を精度の悪いものにする危険性をもつ。一方，質的な標識によって分類された林分について，その林分の有する蓄積その他の量を求めることは，森林の質と量の両側面を統一して捉えることになり，同時にそれぞれの林分の特質を明らかにする手段となりうる。

これまでにも林相区分ということで，林分の分類が行われてきた[42),44),66),82)]。しかし，これは森林の構造把握を目的とした分類ではなく，蓄積推定の精度向上を目指した層化であったといえる。したがって，その分類も針葉樹林，広葉樹林，針広混交林といった大まかなものであり，大局的な計画立案には役立つであろうが，現場の仕事には抽象的で現実性が小さかった。林分構造に応じて多様な施業法を選択するという視点に立つ場合，このような大きな分類単位では林分構造の把握は不十分と思われる。一方，あまりに細かすぎる分類は，かえって現実の林分構造の把握を妨げることにもなる。いかなる標識によって，どの程度の細かさの林分の分類を行うかが具体的な問題となってくるが，この問題は森林の自然的条件だけではなく，林業あるいは森林経営の目的とも密接に関連する。したがって，林分の分類は固定的なものではなく，社会経済的条件によっても変化を余儀なくされる。

いかなるものでも，実態的には，おそらく無限の標識でなければ表現しきれないであろう。このようなものをいくらかの標識によって表現して捉えようというのであるから，いかなる標識によるかは，われわれの目的に対して，妥当であるか否か，有効であるか否か，ということと相対的関係になくてはならない[21)]。筆者は，林業経営の目的が第一義的に木材生産にあり，森林の公益的機能は木材生産を通じて果たすべきであると考える。したがって林業経営の立場から林分構造を把握する場合には，木材を生産するという視点に立って林分分類の標識を選ぶべきである。

まず，生産する木材の質についてみると，樹種によってその物理的・化学的性質が異なるので，樹種ごとに木材の用途も異なってくる。したがって，森林の樹種構成は，木材生産のうえで重要な意味をもっている。これは林分分類の標識として樹種をとりあげる大きな理由となる。

木材生産は，森林→伐採→更新→育成→森林の循環過程の中で行われている。したがって人間がこの過程をいかに統制していくかが，森林施業の本質的課題であるといってよい。

森林は林木とその環境の相互作用によって形成されている。そのために，森林はすべての部分が同様な状態を呈するのではなく，部分部分によって特徴ある外形をもつ林分が成立する。森林の外形が異なることは，森林とその環境との相互作用，また森林内部の相互作用も異なることを意味している。したがって，森林施業のさいには，森林の外形の違いを慎重に考慮

すべきであり，それぞれの林分に応じた取り扱いが必要である。

林分の外形を区別する特徴すなわち標識としては，樹種の混交状態，平均胸高直径，直径階別本数分配，平均樹高，立木本数，樹冠疎密度，樹冠の垂直的構成（樹冠層），地床植物，更新状況などが考えられる。これらのうち平均胸高直径，平均樹高，立木本数などは林業経営と深いかかわりをもつ蓄積の構成要素であり，林分構造を把握するさいの重要な標識となる。樹冠疎密度は，葉による光合成を通して林分の木材生産力と大きな関係があると思われる。樹冠の垂直的構成や直径階別本数分配は，更新や保育の方法を判断するうえで重要な指標となり，地床植物も更新方法と関係してくる。とりわけ樹種は，森林の更新，保育，ひいては地力などあらゆるものと関係していることに留意しなければならない。

モロゾフ[29]は，樹種を外界とともに森林形成の2大因子として重視し，それらの生物学的性質を知る必要性を強調した。彼は樹種によって日光や土壌養分，水分などに対する要求，生長速度およびその継続期間，生存期間，種子によるか萌芽によるかといった繁殖方法，さらに種子の散布法などに差があることを指摘している。

一方，林地に生育している樹種から，その土地の土壌型や地位を判定することができる[31),39),86)]。既往の人工造林地が少なく，地位を判断するための資料に乏しい北海道においては，天然林の樹種の混交状態を識別することにより，人工造林の適地・不適地を予測することは，とくに大きな意義を有している。

このように，林分構造に応じた施業を行うにあたって，樹種は非常に重要な判断の指針となる。

林分の分類を行うのに航空写真を利用しようという試みは，これまでにもなされてきた[5),44),45),82),84)]。これらは林分平均樹高，樹冠疎密度，樹冠の垂直的構成，樹種群といった写真上で確認できる特徴だけを標識としてとりあげている。平均胸高直径や直径階別本数分配，地床植物などは地上調査によってはじめて確認できるのであり，当然，写真判読だけで林分の分類を行うには限界がある。今後は，森林施業の指針となりうる林分の分類を効率よく行うために，航空写真判読と地上調査をいかに組み合わせるかを究明していかねばならない。

また一方では，写真上で確認できる標識について，その判読精度を高める努力が必要である。樹種についていえば，針葉樹林，広葉樹林，針広混交林という大きな樹種群でしか写真に記録されている上層木を把握できなかった。この制約を克服し，ある程度の樹種識別を可能にする写真をえることができれば，林分構造を把握し，集約な森林施業を行ううえで大きな意義をもたらすことができる。

3. 樹種識別に関する従来の研究

航空写真上で識別できる情報としては，量的なものと質的なものがある。量的情報は樹高や樹冠疎密度のように測定できる情報である。質的情報は，判読者が写真画像の色調や形状，きめ等にもとづいてその性質，種類を識別するものであり，樹種や地位，いわゆる活力等が

これに属する。

林分の分類を行う場合，諸情報は単位面積内で平均化され，林分分類の標識とされる。樹種についていえば，単木ごとに識別された樹種がある面積について平均化されると，一般にこれを樹種群と表現する。

これまで行われてきた写真判読による樹種の識別に関する研究は，単木を対象とするものと，樹種群を対象とするものに区別できる。樹種群を対象とする場合は，単木の識別をもとにこれを判定する方法と，最初から直接的にこれを識別する方法がある。本論文ではこれらすべてを樹種識別として取り扱っている。

写真画像の判読を行う場合，被写体から反射される電磁波をフィルム上に記録しなければならない。したがって，フィルムの性質は判読に決定的な影響を及ぼす。フィルムは，歴史的にみると，まず可視光線領域に感度をもつオルソクロマチックフィルム，パンクロマチックフィルムが開発された。その後，近赤外線領域にも感度をもつ赤外線フィルムが実用に供された。さらにカラー写真が開発されたが，肉眼の感じに忠実に再現することを目的とした天然色フィルム(リアルカラーフィルム)がまず実用化された。ついで，目的とするものの区別を明瞭にするため，肉眼の感じとは異なる色彩として表わすフォールスカラーフィルムが開発された。これには赤外カラーフィルム，スペクトロゾナルフィルム等がある。近年では，可視光線から近赤外線領域の電磁波を複数の波長帯域(スペクトルバンド)に分割し，フィルムによって波長帯域ごとに記録するカメラ方式によるマルチスペクトル画像(一般的にマルチスペクトル写真と呼ばれている)も利用されている。さらにフィルムを使わずに，より広い波長領域の電磁波をより狭い波長帯域に分割・記録するスキャナー方式によるマルチスペクトル画像も実用に供されるようになった。

樹種の識別方法は，上記のように発達してきた，被写体から反射される電磁波を記録する手法によって異なってくる。そこで，フィルムを中心とした電磁波を記録する手法によって，樹種識別に関する従来の研究を整理し考察することにする。

(1) モノクロームフィルムを利用したもの

モノクロームフィルムは，主として電磁波の空間特性[12](物体の形状，大きさなど)を把握するものであるが，さらに，パンクロマチックフィルムでは可視光線の反射エネルギー強度を，赤外線フィルムでは近赤外線の反射エネルギー強度を写真色調として記録する。パンクロマチックフィルムは今日においても最も多く利用され，赤外線フィルムがこれに次いでいる。したがって，これらのフィルムを用いた樹種識別については多数の報告がなされている。

LOETSCH and HALLER[38]は従来の研究を整理し，写真判読による樹種の識別には，形状，大きさ，色調，きめ，陰影，模様，位置，結合関係といった絵画的要素が用いられることを指摘した。これらの要素を用いて樹種の識別を行う研究は，1要素だけを用いて識別しようとする研究と，いくつかの要素を組み合わせて樹種識別のための判読の「鍵」とする研究に大きく

分けることができる。

前者の研究では，そのほとんどが樹冠の形状[17),45),51),89)]あるいは色調を用いている。写真色調は，フィルムの種類，使用フィルター，撮影季節によって大きな影響を受ける。したがって，樹種相互間の色調差を大きくするような条件を考察した報告がなされている[70),75),89)]。また写真濃度測定機によって色調を測定し，その波形グラフあるいはデジタル濃度から樹種識別を自動的に行おうとする試みや[6),7),20),43),63)]デジタルカラー写真を用いて樹種識別の能率化を図る試みがなされている[27),60)]。

後者の研究では，様々な要素の組み合わせが検討されているが[23),26),28),49),52),70),72),75),76),81),93)]，なかでも樹冠の形状や色調，生育位置が判読の「鍵」の重要な構成要素である。ZSILINSZKY[94)]は判読の「鍵」とともにステレオグラムを併用して効果をあげている。また，林地の傾斜や林分構造，判読倍率，使用器材などが樹種識別に与える影響について考察した研究もみられる[26),40)]。

モノクローム写真による樹種識別は，判読者の熟練に依存する面が非常に大きいという限界を有している。そのため，写真濃度測定機やデジタルカラー装置を導入し，色調を濃度として数量化することにより，樹種識別を客観化しようという方向に進んできた。しかし，その精度は大きく劣っている。

(2)　カラーフィルムを利用したもの

カラーフィルムはリアルカラーとフォールスカラーに分類でき，後者として，現在，赤外カラーフィルムと Blue-Insensitive Color Film の2種類がある。ソ連では，スペクトロゾナルフィルムとして多数の種類のフォールスカラーフィルムが開発されているといわれるが，文献でしか知られておらず，不明な点が多い[9),56)]。

これまでに開発されている各種のカラーおよびモノクロームフィルムの中から，樹種の識別に最も有効なフィルムの種類を見出そうと，多数の研究がなされてきた[4),46),48),59),68),74),87)]。この場合，撮影縮尺や撮影季節と関連させて考察されることが多い。カラーフィルムは，電磁波の空間特性とともに，色彩として分光特性[12)]をも捉えることができるので，一般にモノクロームフィルムより樹種識別の効果は大きい。なかでも，赤外カラーフィルムの効果の大きいことが認められている。

赤外カラーフィルムによる樹種識別については，主要樹種のフィルム上での発色に関する報告[54),59),68)]や，ミクロデンシトメーターあるいはデジタルカラー装置を用いた解析[34),37)]がなされている。江森等[11)]は，赤外カラーフィルム上の樹木の色度を測定し，色度図上に表示することにより，樹種の自動判別の可能性を検討した。

(3)　マルチスペクトル画像を利用したもの

マルチスペクトル画像は開発の歴史も浅く，これを利用した樹種の識別に関する研究はまだ数も少ない。カメラ方式のマルチスペクトル画像を利用したものには，合成した赤外カラー写真上の色度を測定した結果の報告[92)]や，4波長帯域の写真濃度から樹種等を自動的に判別す

る試み[24),85)]，波長帯域別写真の濃度特性の検討[22)]がある。スキャナー方式を利用したものとして，6チャンネルのマルチスペクトルデータから樹種の識別を試みたROHDE and OLSON[69)]の研究がある。

以上フィルムを中心に，樹種の識別に関する従来の研究を概観してきた。これらの研究についてつぎのような問題点を指摘することができる。

① つぎつぎに開発されるフィルムの性能を検査することが最大の研究目的となった観がある。

② 異なる種類のフィルムの間で樹種識別の効果を比較する場合，判読者の主観に大きく左右されていた。

③ 写真判読の方法は，肉眼判読から自動判読へと急速に移行しつつある。しかし，自動判読は一般に数値処理の容易な写真色調だけを利用するため，十分な精度で樹種識別を行うことが難しい。

④ 自動判読に偏向しすぎると，判読の「鍵」のような，長年多数の研究者によって積み重ねられてきた貴重な研究遺産を継承し発展させることができなくなる。

4. 研究の目的と方法

航空写真を利用して行う調査は，精度においても能率においても，写真画像の質によって基本的に左右される。写真画像の質に影響を与える因子として，これまで多数の因子が指摘されている[1),2),3),55)]。HELLER[9)]はこのような因子として

① 物理的因子……被写体の放射および反射特性，大気中の光の散乱，太陽角度，太陽光線の分光特性など

② フィルムとフィルターの特性

③ カメラと装置……レンズ，シャッター，画像移動補償装置，マルチスペクトル技法などをあげている。

航空写真によって樹種の識別を行うにあたっては，これらの因子を考慮し，まず樹種識別に最適な写真の条件を明らかにしておかねばならない。その場合，一般的な写真測量と共通する最適条件と，樹種識別に固有の最適条件とに分けて考えることができる。前者は判読に障害となる陰影ができるだけ小さくなるような太陽角度をえることのできる撮影時刻，大気中の光の散乱を最小にする天候，高い解像力の写真を保証するカメラと補助装置といったものである。これらは従来の多くの研究によって明らかにされているので，航空写真による樹種の識別においては，後者の条件を明らかにすることが重要な研究課題となる。

太陽光線は非常に幅広い波長をもつ電磁波であり，地上の物体はこの電磁波に対してそれぞれ特有の分光反射率を示す。樹種識別にあたっては，樹種によるこの分光反射特性の違いを記録することが必要である。

樹種の分光反射特性は季節によって変化するので，撮影季節は，航空写真による樹種識別

にとって非常に重要な条件である。樹葉の分光反射特性の季節変化を調べた研究[9),62)]によれば生長期の初期と後期においてはその変化が非常に激しい。また新緑や開花，紅葉はきわめて限られた期間に生じる現象である。しかもその色彩変化は，すべての樹木，またすべての樹種で一様に進むものではない。したがって，どの時点においてもいろんな新緑や紅葉の段階が存在しているので，これらの時期に撮影された写真は樹種の識別を非常に複雑にする。ところが，いったん成熟した葉の分光反射特性は，何らかの外的因子が葉の化学的性質を変化させない限り，生長期の中期すなわち夏季を通して一定である。したがって夏季に撮影される写真は，樹種間の分光反射特性の差はそれほど大きくないかもしれないが，安定した状態にある。このため撮影時期選択の自由度も大きく，適用期間の長い樹種識別のための判読の「鍵」を作成できる。

航空写真は地上の被写体から反射される太陽光線をフィルムに記録したものであるから，フィルムの種類は，写真画像の質に決定的な影響を与える。樹種識別を効果的に行うためには樹種による分光反射特性の違いを記録できるフィルムが用いられなければならない。

航空写真における最近の動向をみると，カラー写真に重点が指向されてきており，さらに地上の各被写体のもつ固有の天然の色彩をリアルに再現することよりも，被写体のもつ独自の分光反射を記録するため，フォールスカラーフィルムの開発が重視されつつある[56)]。I-3で述べたように，これまでにもつぎつぎに新しい種類のフィルムが開発されてきた。そのため樹種識別についての従来の研究は，本来の目的から離れて新しいフィルムの性能を調査することが最大の研究目的となった観がある。従来のようなやり方では，効果的な樹種識別の手順，さらに森林調査への写真利用の体系を確立するまでいかないうちに，また新しい種類のフィルムが開発されるということになり，写真工業の発達に振り回される危険性をもつ。森林調査に写真を応用する側の立場に立てば，樹種識別に最適のフィルムの種類を明らかにし，もしもそれが未開発のものであればその開発を目指すという方向にもっていくことが望ましい。この研究の第一の目的は，樹種識別に最適なカラーフィルムの種類を見出すことにある。

カラーフィルムは，被写体からの反射光を複数の波長帯域に分割して同時に記録することにより，被写体の分光反射特性を色彩として記録することができる。リアルカラーフィルムはベース上に青，緑，赤の3つの波長帯域にそれぞれ感光する3層の乳剤層をもっている。赤外カラーフィルムも3層の乳剤層をもっているが，その3層はそれぞれ緑，赤および近赤外の波長帯域に感光する特性をもっている点でリアルカラーフィルムと異なる。Blue-Insensitive Color Film は緑と赤の波長帯域にそれぞれ感光する2層の乳剤層をもっている。すでに開発されているこれらのカラーフィルム以外に，乳剤層の組み合わせを変えることによって新しく各種のフィルムを考えることができる。すなわちフィルムの種類は，その感光乳剤層が地上から反射される電磁波のどの波長帯域を捉えるかによって基本的に決定される。したがって，樹種の識別に効果の大きい波長帯域の組み合わせを見出すことができれば，その波長帯域を感光

層とするフィルムが樹種識別に最適であるといえよう。

これまで一般的に，撮影高度あるいは縮尺が写真判読に大きな影響を与えるといわれてきた。しかし樹種を識別するという立場から，この点について実際に十分な検討を行った研究はほとんどなされていない。この研究の第二の目的は，撮影高度が樹種の識別に及ぼす効果を比較検討することである。

樹種識別の精度は，航空写真のもつ条件だけではなく，写真判読の方法によっても大きく異なってくる。写真判読には，簡単な器具を補助的に用いて人間の眼で判読する肉眼判読と，複雑な測定機械およびコンピューターを使って自動的に被写体の識別を行う自動判読の２つがある。肉眼判読は従来から行われてきた方法であり，判読者に高度の熟練が要求される。自動判読は近年注目されるようになったものであるが，判読要素として，一般にコンピューターによるデジタル処理を行い易い写真色調だけを用いる。したがって自動判読では十分な精度で樹種識別を行うことが難しい。さらに，樹種の形態的特徴を中心とした判読の「鍵」のような，今日まで多数の研究者によって発展させられてきた従来の写真判読要領を有効に継承することも不可能である。このような自動判読の限界を克服するためには，写真色調以外の判読要素の重要性を見直す必要がある。そこで筆者は，この研究の第三の目的として，肉眼判読と自動判読を統一することにより，技能的性格の濃厚であった従来の樹種識別を普遍性のあるものに高めていく方向を探ることにした。

樹種識別に最適な航空写真の条件を検討するにあたっては，条件の異なる写真がもつ樹種識別の効果を，できるだけ客観的，定量的に評価する方法を考えておかねばならない。このような方法によってはじめて，判読者の主観に左右されない樹種識別に最適なフィルムの種類や撮影高度を明らかにすることができよう。

この研究は以上のような観点に立って進めたものである。

つぎに本論文の構成について簡単に説明しておく。

まずＩにおいて，本研究のもつ意義と目的が述べられてきた。

IIにおいては，樹種識別に有効な波長帯域を検討するための材料をえる方法，さらに樹種識別の効果を定量的に評価する方法など，野外試験の方法について説明する。

IIIでは，野外試験の結果から，撮影高度との関連におて，樹種識別に効果的な波長帯域の組み合わせが判定される。

IVでは，IIIで判定された波長帯域の組み合わせによって実際にカラー写真を作成し，それが樹種識別に大きな効果を有することを検証する。

Vにおいては，肉眼判読と自動判読を統一することにより，従来の樹種識別のもつ限界を克服する方向を探求している。

VIは本研究の結論にあてられている。ここでは今後の課題に触れ，さらに新しい樹種識別の手順を本研究の成果に基づいて提案する。

II. 野外試験の方法

1. 試験地の設定

(1) 試験地の概況

本研究を行うにあたり，札幌営林局定山渓営林署石山事業区の1204林班から1209林班にわたる地域をその対象として選んだ。この付近一帯は石狩川の1支流である月寒川上流にあたる丘陵地帯となっている。試験地は月寒川左岸に位置し，標高160 mから200 mにわたる地域である。ここには昭和2年植栽のトドマツ，エゾマツ，昭和3年植栽のドイツトウヒ，昭和26年植栽のカラマツなどの人工造林地が存在し，そのほとんどが伐採できる径級に達している。さらにヤチダモ，ハルニレ，ミズナラ，イタヤカエデ，カンバなどを主要樹種とする広葉樹二次林が分布し，その無立木地にはササが密生している。

この試験地は，筆者の研究を進めるにあたって，つぎのような好条件を備えている。

① 地形が比較的単純であり，航空写真の色調に対する地形の影響を小さくできる。

② 小面積の地域に，ほぼ同じ林齢の各種樹種の人工造林地が存在し，また広葉樹二次林も分布しているため，多数の樹種の供試木や供試プロットをとることができる。

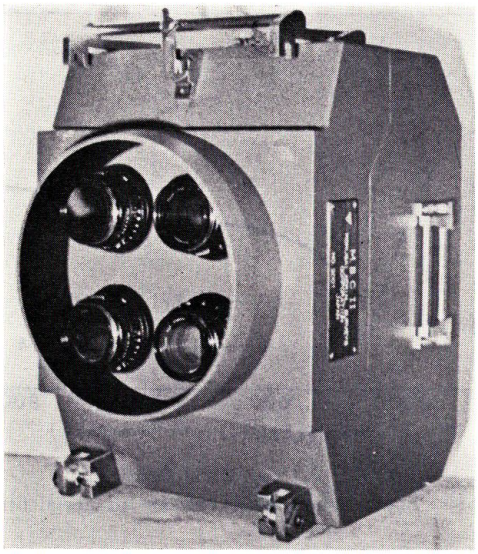
③ 林道や歩道が発達しており，現地調査に便利である。

(2) マルチスペクトル写真の撮影

マルチスペクトル写真はマルチスペクトル画像の一種である。マルチスペクトル画像は，カメラ，スキャナー，レーダーの3種のセンサーによってえることができるもので，主としてセンサーの視角内にある被写体から放射，反射される電磁波スペクトルのエネルギー強度を，限定された狭い波長領域毎に分割して個別に記録しておき，これによってえられたそれぞれの画像特性を，単独に解析し，または複数の画像を，各種の組み合わせによって処理し，画像の定性的解釈や測定を行うものである[58]。マルチスペクトル写真は，このうちカメラによってえられる画像である。ORR[64]はこれを，地表から反射された電磁波エネルギーをいくつかの波長帯域に分離し，それぞれの波長帯域を別々に白黒フィルム上に記録するものである，と定義している。波長帯域の選択は適当なフィルターとフィルムとを組み合わせて行う。

昭和49年7月12日と18日の両日にわたって試験地のマルチスペクトル写真を撮影した。その際に使用したカメラはコクサイ・マルチスペクトルカメラ—II型(KMC-II)[57]である。これは70ミリカメラ4台を結合して同時に作動するようにしたものである。カメラ本体はハッセルブラッド500 EL/M 70を使用している。レンズは，プラナー100 mmおよびディスタゴン50 mmの2本を，撮影目的，写真縮尺などによって随時交換することが可能である。画面サイズは55×55 mmである。KMC-IIの外観を写真-1に示す。

本研究では，青(B)，緑(G)，赤(R)，近赤外(IR)の4波長帯域のマルチスペクトル写真をえるため，表-1のようにフィルムとフィルターを組み合わせて撮影した。使用したパンクロマ



写真—1 マルチスペクトルカメラ KMC-II
Photo 1. KMC-II multispectral camera.

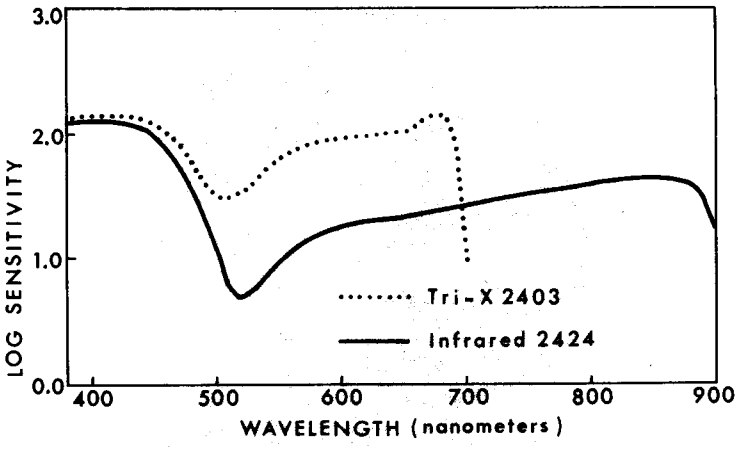
表—1 フィルムとフィルターの組み合わせ
Table 1. Film-filter combination

カメラ No. Camera No.	使用フィルム Film	フィルター Filter	波長帯域 (nm) Spectral band
1	Kodak Tri-X 2403	Wratten No. 47 B	B band (400～500)
2	Kodak Tri-X 2403	Wratten No. 58	G band (500～600)
3	Kodak Tri-X 2403	Wratten No. 25	R band (600～700)
4	Kodak Infrared 2424	Wratten No. 89 B	IR band (700～900)

チックフィルムと赤外線フィルムの分光感度曲線[13]を図-1に，フィルターの分光透過曲線[14]を図-2に示しておく。

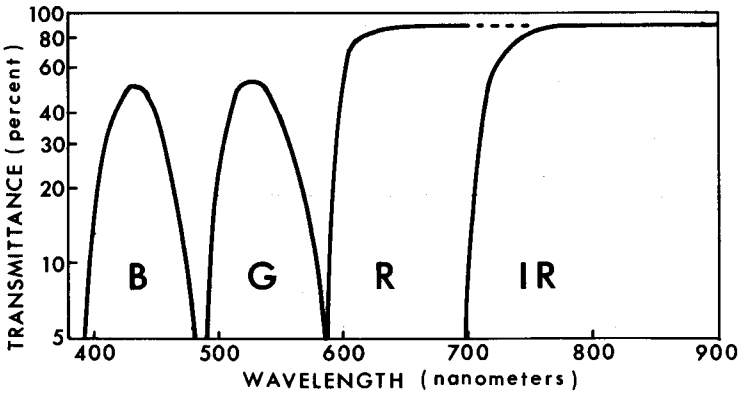
樹種識別と撮影高度との関連を検討するため，地表からの高度を 500 m (縮尺 1 : 5,000), 1,000 m (1 : 10,000), 2,000 m (1 : 20,000) の 3 段階に変えて撮影した。使用した写真枚数は，撮影高度 500 m では 9 枚，1,000 m では 7 枚，2,000 m では 6 枚である。

撮影季節は夏季としたが，これは I-4 で述べた理由による。航空写真を撮影する時刻は，影の部分を小さくするのに適した照明と良好な分光組成をえるため，真昼とすべきである[9),10)]。安田・江森[90]は北海道で可視～近赤外の 4 波長帯域における太陽照明光の変化を測定した例を報告している。それによれば，正午を境に太陽高度は対称的に変化するので照明光の強度や分光組成も対称的に変化するものと考えられるが，実際には大気中に含まれる散乱物質の成分や量は午前と午後で異なるのが普通であり，午後の方が水蒸気などによる散乱・吸収の影響が大となる。したがって，マルチスペクトル写真の撮影は 10 時～12 時前後に行うのが望ましいと



図—1 フィルムの分光感度曲線

Fig. 1. Spectral sensitivity curves for aerial films.



図—2 フィルターの分光透過曲線

Fig. 2. Spectral transmission curves of filters for multispectral camera.

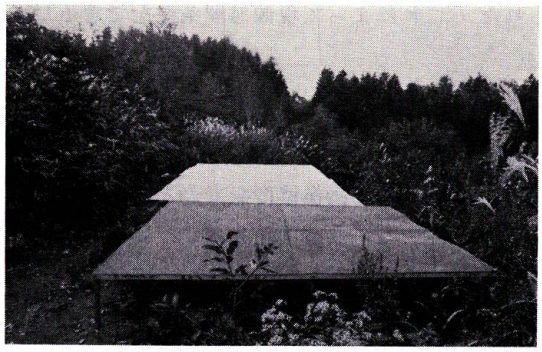
表—2 撮影記録

Table 2. Photographing data

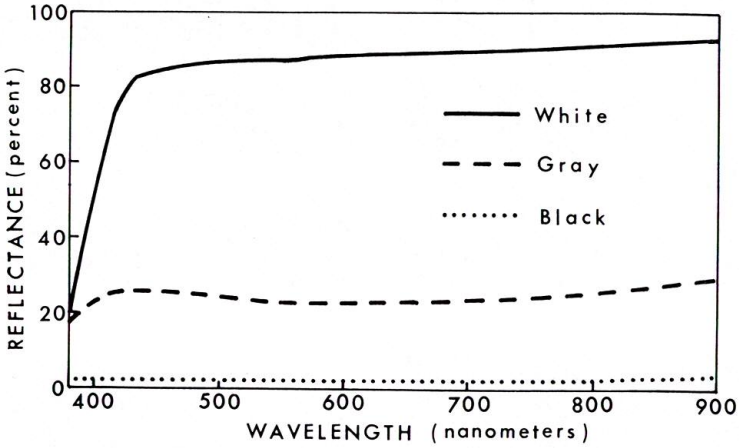
撮影用航空機 Aircraft	Cessna 206		
撮影日 Date	July 18, 1974	July 12, 1974	July 12, 1974
撮影時刻 Time of day	11:20～11:21	10:23～10:24	10:37～10:38
撮影高度 Flight height above ground	500 m	1,000 m	2,000 m
撮影縮尺 Photo scale	1:5,000	1:10,000	1:20,000
カメラ Camera	KOKUSAI Multispectral camera Type-II		
レンズ Lens	Zeiss planer (Focal length=100 mm)		
写真サイズ Frame size	55 mm×55 mm		
シャッター速度 Shutter speed	1/500 sec.		
絞り F-number	B band	F=4～5.6	
	G band	F=4～5.6	
	R band	F=5.6～8	
	IR band	F=11	

している。試験地のマルチスペクトル写真を撮影したときの条件は表-2のとおりである。

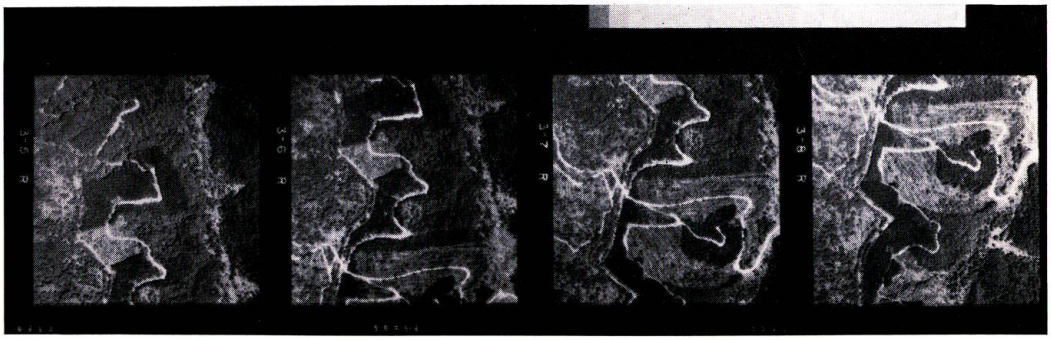
撮影に先立って，写真-2に示されるような地上標準反射板が設置された。これは白，灰，黒の3段階のグレースケールとなっており，それらの分光反射曲線を図-3に示す。この標準反射板はフィルムの現像処理を適正に管理するとともに，カラー写真を合成するさいの基準と



写真—2 地上標準反射板
Photo 2. Gray scale panels.



図—3 地上標準反射板の分光反射曲線
Fig. 3. Spectral reflectance curves of gray scale panels.

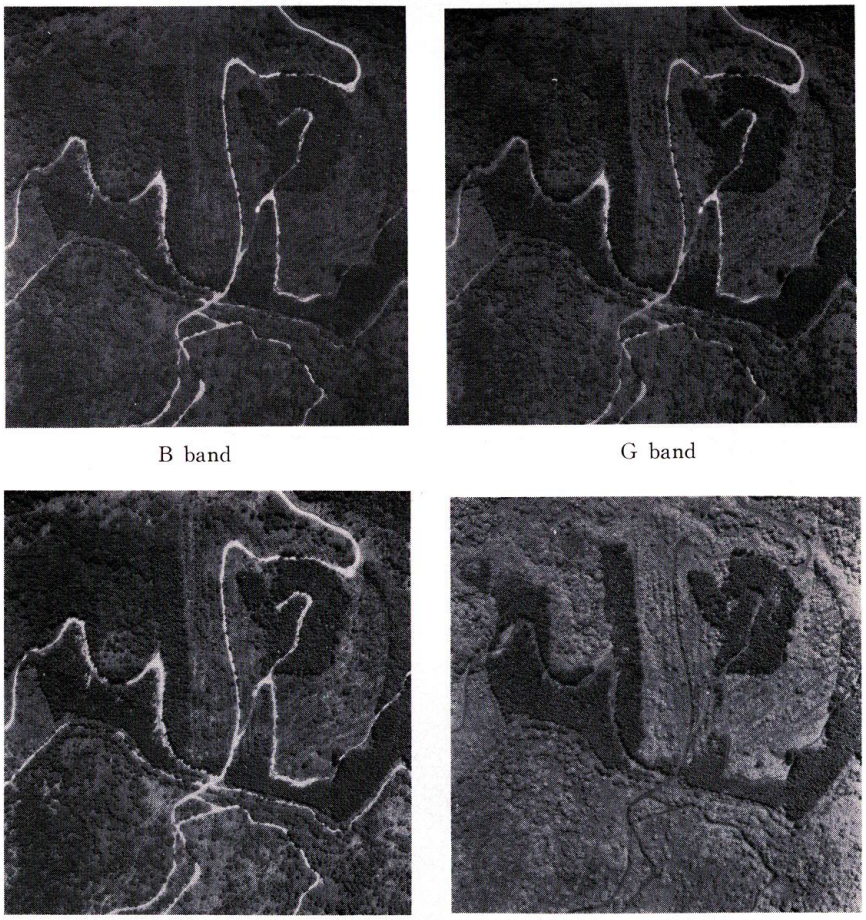


写真—3 グレースケールを焼き付けた白黒ポジフィルムの例
Photo 3. Example of black-and-white positive films with gray scale.

するために設置したものである。したがって各スケールの大きさは，フィルム上でこの像の濃度や色彩を測定できる大きさとなるよう3.6×3.6 mとした。

マルチスペクトルカメラによって撮影された白黒ネガフィルムを白黒ポジフィルムに変換するさいに，連続する4枚のフィルムを1単位として，写真-3ように標準濃度基準板（グレースケール）が焼き付けられた。これによって現像処理条件をできるだけ一定にし，画像濃度への影響を除くためである。

航空写真においては，撮影時の露光条件，その後の現像処理条件，さらに焼き付け条件を厳密に一定に保つことは困難である。このために同じスペクトル反射強度をもつ被写体が異なる写真に撮影されている場合，必ず同じ画像濃度をもつとは限らない。しかしこの研究に用いたマルチスペクトル写真はきわめて短い時間内に連続して撮影されており，その間の露光条件



写真—4　マルチスペクトル写真の例（撮影高度1,000 m，縮尺1：10,000）

Photo 4.　Example of multispectral photograph obtained at flight altitude of 1,000 meters (scale of 1 : 10,000).

は一定であるとして取り扱いうる。またそのネガフィルムは同時に現像されているので，写真間の現像条件も一定とみなすことができる。さらにネガフィルムから密着ポジフィルムを作成するさいには上記のような配慮がなされた。このように，使用したポジフィルムは露光・現像処理条件の変動を小さくするために細心の注意が払われており，本研究ではこれらの条件の画像濃度への影響を無視できるものとして取り扱った。

撮影されたマルチスペクトル写真の1例を写真-4に示す。

(3) 供試木と供試プロットの選定

まず試験地内の樹種分布の概況をつかむために予備調査を行い，出現頻度の高い樹種を研究の対象として選んだ。

単木の樹種としては，ドイツトウヒ，エゾマツ，トドマツ，カラマツ，ミズナラ，カンバ，イタヤ，ヤチダモ，ハルニレの針葉樹4樹種，広葉樹5樹種の合計9樹種を選んだ。さらに上記諸樹種の写真濃度と比較するために，アカエゾマツ，ササ，林道をもとりあげた。このアカエゾマツは成林しているものの，他の樹種に比べてかなり幼齢である（平均樹高11 m，平均胸高直径16 cm）。

一方，林分の樹種群として，ドイツトウヒ林，トドマツ林，カラマツ林，シラカンバ林，その他広葉樹林，およびササの合計6カテゴリーを設けることにした。ササは北海道内の天然林地帯に広く分布し，天然更新上きわめて重要な意味をもっているので，これを1つのカテゴリーとして加えることが現代的な課題にそうものであるといってよい。

単木の樹種識別について検討するため，各樹種ごとに一定数の供試木を選んだ。このための地上調査にあたっては，撮影縮尺1:5,000（撮影高度500 m）と1:10,000（1,000 m）のRバンド写真を3倍に引き伸ばしたプリントとマグネット式携帯用実体鏡を携行した。供試木はその樹冠が500 mと1,000 mの両高度の写真上で明瞭に識別できるものから選んだ。これらは現地で実体視して確認したうえ，撮影高度の異なる2枚のプリント上に刺針した。

一方，林分の樹種識別を検討するために，各樹種群ごとに一定数の供試プロットをとった。供試プロットの大きさは直径20 mの円とし，撮影縮尺1:20,000（撮影高度2,000 m）のRバンド写真を3倍に引き伸ばしたプリント上に，このプロットの中心を刺針した。これらのプロットは，林冠が十分に閉鎖し，それぞれの樹種群の代表的林況を呈していると思われる箇所を選んでいる。

この研究においては，後述するように，写真のもつ樹種識別の効果を客観的に比較するうえで，写真濃度が重要な役割を果たしている。したがって，樹種固有の写真濃度を知るうえでノイズとなる要因はできるだけ除いておかねばならない。

露光および現像処理条件の違いは写真濃度に大きな変動を与える。この研究においては，II-1-(2)で述べたごとく，露光および現像処理条件を一定に保つことができるように十分な配慮が払われている。

さらに樹種固有の分光反射特性を変動させる主な要因として，①樹種内の遺伝的変動，②地位による活力の差，③樹齢の差，④病害などによる異常，が考えられる。そこで供試木を選ぶさいに，これらの影響を除去するように努めた。①と②の影響を避けるため，供試木を試験地内のあらゆる地形や地域に分散した。③については広葉樹二次林が問題となるが，この場合にはすでに成熟していると思われる中径木から供試木を選び，小径木を除外するという処置をとった。④については，病害や虫菌害など何らかの原因で明らかに樹葉の色彩が変化している樹木を除外した。

傾斜度，傾斜方位などの地形条件は太陽光線の反射量に大きな影響を与える。さらに地形は地位とも関連し，樹木に活力差を生じさせ，画像濃度に影響を与えることも考えられる。この研究においては，試験地を月寒川左岸に限定することにより，地形に起因するノイズを小さくするように配慮している。

さらに，試験地内の地形変化が写真濃度に及ぼす影響について検討した。このための材料として撮影縮尺1:10,000のGバンドフィルム2枚を使用した。Gバンドを選んだのは，緑色植物が可視波長領域ではここで最大の反射量を有しているからである。一方のフィルムには昭和2年植栽のトドマツ一斉人工林が，他方のフィルムには昭和26年植栽のカラマツ一斉人工林が撮影されている。2種類の樹種について検討したのは，地形に起因する樹木の活力差が，分光反射特性の違いとして，ひいては写真濃度差として現われやすい樹種とそうでない樹種があるのではないかと考えたからである。トドマツ人工林を，地形によって北斜面で平均傾斜14°，東斜面で平均傾斜20°，南西斜面で平均傾斜14°の3地区に区分し，各地区ごとに20本の標本木を選んだ。カラマツ人工林は，東斜面下部（平均傾斜20°），東斜面中腹部（18°），東斜面上部（20°），南斜面（24°）の4地区に区分し，各20本の標本木を選んだ。これらの標本木についてフィルム上の画像の濃度を測定し（測定口径0.2 mm），地形別画像濃度の分散分析を行った。トドマツについては，級間と級内不偏分散の比が2.3101，カラマツについては分散比が0.4951となり，どちらも危険率5%で有意差が認められなかった。したがって，当試験地内では，地形変化が供試木と供試プロットの画像濃度に及ぼす影響には有意の差がないものとして扱いうることを知った。

レンズはその中心部において光の透過率が高く，周辺になるにしたがってそれが低下する。このためフィルムの画面位置によって画像の濃度が変化する恐れがあり，画像濃度の測定においてはこの点を考慮することが必要である。そのため，昭和2年植栽のトドマツ一斉人工林が画面全体を占める縮尺1:5,000のGバンドフィルムを用いて検討を行った。

画面をフィルムの中心から半径10 mmの範囲，10～15 mmの範囲，15～20 mmの範囲，20～25 mmの範囲，25 mm以上の範囲の5つに区分した。それぞれの画面位置から20本の標本木を選び，その画像濃度を測定し（測定口径0.4 mm），分散分析を行った。この結果分散比は2.6264となり，危険率1%では画面位置によって画像濃度に有意差が認められないが，危険率

表—3 画面位置間の画像濃度の差の検定

Table 3. Test of the difference of average photographic density by radial distance

画面主点からの距離 radial distance (mm)	0～10	10～15	15～20	20～25	25～
0～10	—				
10～15	0.0075	—			
15～20	0.0220	0.0145	—		
20～25	0.0195	0.0120	0.0025	—	
25～	0.0355*	0.0280*	0.0135	0.0160	—

* 5% 水準で有意 Significant at 5% level

表—4 供試木本数

Table 4. Number of sample trees

樹種	Tree species	(Symbol)	本数 Number
ドイツトウヒ	*Picea abies*	(P)	30
エゾマツ	*Picea jezoensis*	(Pj)	30
トドマツ	*Abies sachalinensis*	(As)	30
カラマツ	*Larix leptolepis*	(L)	21
ミズナラ	*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*	(Q)	30
カンバ	*Betula platyphylla* var. *japonica* & *Betula ermanii*	(B)	30
イタヤ	*Acer mono* & *Acer mayrii*	(A)	30
ヤチダモ	*Fraxinus mandshurica* var. *japonica*	(F)	26
ハルニレ	*Ulmus davidiana* var. *japonica*	(U)	30
合計	Total		257
林道	forest-road	(R)	30
ササ	*Sasa senanensis* & *Sasa kurilensis*	(S)	20
アカエゾマツ	*Picea glehnii*	(Pg)	21

表—5 供試プロット数

Table 5. Number of sample plots

樹種群	Tree species group	(Symbol)	プロット数 Number
ドイツトウヒ林	*Picea abies* forest	(PF)	15
トドマツ林	*Abies sachalinensis* forest	(AF)	15
カラマツ林	*Larix leptolepis* forest	(LF)	15
シラカンバ林	*Betula platypylla* var. *japonica* forest	(BF)	10
広葉樹林	Broad leaved forest	(BL)	30
ササ	*Sasa*	(SS)	15
合計	Total		100

5% では有意差が認められる。そこで危険率を5%とした場合，画面位置のどの水準間の主要効果に有意差があるかを検定するため，各水準間の母平均の差を推定した。この結果は表-3に示すとおりである。これによれば，主点から半径10 mm 以内と25 mm 以上，10～15 mm と25 mm 以上の範囲の間で画像濃度に有意差があることが認められる。すなわち，フィルムの中心から25 mm 以内の範囲であれば画面位置が濃度に及ぼす影響を無視できることを知る。したがって，供試木および供試プロットはすべてこの範囲内で選定した。

試験地を十分に踏査し，現地で撮影高度500 m と1,000 m の写真を実体視しながら選んだ供試木の本数を表-4に，撮影高度2,000 m の写真を実体視しながら選んだ供試プロットの数を表-5に示す。

樹種のように質的なものを推定する場合には，母集団の平均値を推定する場合とは異なり目標精度から標本の大きさを決定するというような統計的方法は存在しない。したがってこの研究を行うにあたって，各樹種の供試木本数，あるいは各樹種群の供試プロット数の大きさをどうするかは大きな問題であった。この研究では，後述するように，樹種識別に効果的な波長帯域の組み合わせを画像濃度によって検討する。そこで供試木本数，供試プロット数を決めるための手掛かりとしてフィルム上の画像濃度を利用した。

単木については，針葉樹の代表としてトドマツを，広葉樹の代表としてミズナラを選び，撮影縮尺1:10,000のGバンドとIRバンド写真におけるその画像濃度の母集団の平均値を推定する場合を考える。Gバンドを選んだのは植物が緑色をしているためであり，IRバンドを選んだのは従来から樹種の識別に効果があるといわれていることによる。予備調査として，トドマツとミズナラについてそれぞれ30本の標本木をとり，GおよびIRの2バンドの画像濃度を測定した。この結果をもとに，信頼度95%，目標精度を10%として，母集団の画像濃度の平均値を推定するために何本の標本木をとればよいかを次式によって計算した。

$$n_0 = \left(\frac{t \cdot c}{p}\right)^2 \qquad (1)$$

n_0: 抽出個数　　t: 信頼度係数
c: 変動係数　　p: 目標精度

この結果，Gバンドについてはトドマツの標本木は7本，ミズナラは5本となる。IRバンドについてはトドマツは10本，ミズナラは7本となる。したがって各樹種につき10本の標本木をとれば所期の目的を果たすことができることになる。この研究が質的なものの推定であることを考慮して安全度を大きく見積もり，各樹種ごとに30本の供試木を選んだ。しかし縮尺1:5,000の撮影面積が小さいため，カラマツとヤチダモについては30本に満たなかった。

樹種群についても縮尺1:20,000写真を使用し，トドマツ林と広葉樹林によって同様の検討を行った。この結果，Gバンドについては，トドマツ林は9プロット，広葉樹林は16プロットとなった。IRバンドについては，トドマツ林は1プロット，広葉樹林は10プロットとなっ

た。そこで安全度を大きくとって針葉樹の各樹種群については供試プロットを15とし，広葉樹林については30とした。シラカンバ林についてはG, IR両バンドとも4プロットとなったので，これまた安全度を見積もって10プロットを設けることにした。

2. 樹種識別に効果的な写真条件の判定

(1) 識別効果を定量的に比較する方法

条件の異なる航空写真間で樹種識別の効果を定量的に比較しようという場合，従来の研究では，1人あるいは複数の判読者が航空写真を実体視して樹種を識別し，その結果を本数かプロット数あるいは面積と関連させて識別の的中率を算出していた[40),59),87)]。しかし，この方法は判読者の熟練度など人的因子によって大きな影響を受ける。そこで，本研究を進めるにあたって，この人的因子による誤差を排除し，客観的に樹種識別の効果を比較する方法について検討した。

航空写真によって樹種を識別するさいには，その手掛かりとして

① 形態的特徴……樹冠形，樹高など

② 生態的特徴……生育位置，群落状況など

③ 写真色調……白黒写真では濃度，カラー写真では色彩

が利用される。このうち①と②は測定することが困難であり，肉眼によって判読されるため，①と②の判読は判読者の熟練度に左右される。ところが①と②は，航空写真の条件が異なっても，たとえば波長帯域やフィルムの種類が異なっても，変化することなく一定である。さらに撮影縮尺が変化しても，フィルムの解像力が十分でさえあれば，①と②の特徴は基本的に不変である。したがって，条件の異なる写真間で樹種識別の効果を比較するさいには，③の写真色調だけを考慮すればよいことに筆者は注目した。

写真色調は測定し数値化することができ，これを用いて客観的な識別効果の比較を行うことが可能である。まず，供試木，供試プロットの樹種を，数値化した色調によって統計数理的に判別する。そうすればこのときの的中率によって，樹種識別の効果を客観的，定量的に比較することができるわけである。写真色調から統計数理的に樹種を判別する手法としては判別関数法を用いた。

(2) 写真色調の測定

筆者は写真色調を，白黒写真画像の明暗の度合いとカラー写真画像の色彩の両方を包含する言葉として使っている。白黒写真の色調を測定し数量的に表わす場合には(光学)濃度が用いられる。

フィルム上の画像の濃度 D は

$$D = \log_{10} \frac{1}{T} \tag{2}$$

で定義される。ここで T はフィルム画像の光の透過度であり，

$$T=\frac{I}{I_0} \tag{3}$$

I_0: 入射光の強さ　　I: 透過光の強さ

によって定義される。本研究では透過度の測定にあたって，フィルムベースの透過度を1としている。透過度の測定には自動色彩計 Quick Color Eye を使用した。

ここで色彩測定の原理について概略を述べる[32),35)]。色彩の測定すなわち測色は，適当な3つの色光を適当な割合で混合することによって，任意の色に等色できるという3原色説にもとづいている。すなわち人間の眼の内部には3つの受光器ともいうべきものがあり，その1つは赤に最もよく感じる受光器，第2は緑の色に最もよく感じる受光器，第3は青の色に最もよく感じる受光器である。標準的な観測者の眼の3つの受光器の分光感度 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (スペクトル3刺激値という) はすでに明らかにされており，これを基礎として色を表わす一組の3つの数値を定めることができる。これは3刺激値という名前でよばれている。国際照明委員会 (CIE) で定めた測色システムの XYZ 表色系における3刺激値 X, Y, Z は

$$\left.\begin{aligned} X&=\frac{\int_{380}^{780}S(\lambda)\,\rho(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,d\lambda}{\int_{380}^{780}S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}\\ Y&=\frac{\int_{380}^{780}S(\lambda)\,\rho(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}{\int_{380}^{780}S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}\\ Z&=\frac{\int_{380}^{780}S(\lambda)\,\rho(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,d\lambda}{\int_{380}^{780}S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

で与えられる。ここに $\rho(\lambda)$ は物体の分光透過率 (または分光反射率)，$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ はスペクトル3刺激値，$S(\lambda)$ は照明光の分光エネルギー分布であり，この研究ではカラー画像 (マルチスペクトルカラー写真) が色温度 5,000°K の照明で観察されるものとしている。XYZ 表色系の色度座標は，

$$x=\frac{X}{X+Y+Z},\qquad y=\frac{Y}{X+Y+Z} \tag{5}$$

で与えられる。物体の色は，視感透過率 (または視感反射率) Y と色度座標 x, y とによって表わされる。

色度座標 x, y を直交座標にプロットしたものを CIE 標準色度図という。この色度図上で表わされる2つの色度点間の距離は，感覚的な色の性質の差に比例しない。もし感覚的な色の性質の差が，色度図上の2点間の距離の差で表わされるような色度図を求めることができれば都合がよい。このような色度図は CIE 1960–UCS 色度図と呼ばれ，その色度座標 u, v は

$$u=\frac{4x}{-2x+12y+3},\qquad v=\frac{6y}{-2x+12y+3} \tag{6}$$

で与えられる。

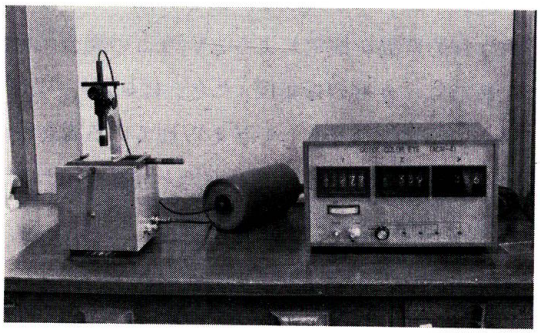
測色する場合，その方法としてつぎの2つがある。第1は分光光度計によって物体の分光

透過率(または分光反射率)を測定し，その測定値から分光計算によって3刺激値を求める方法である。第2は測色によって3刺激値を直接求める方法である。これはスペクトル3刺激値 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ と同じような分光透過率をもつ3枚のフィルターを用いている。この3枚のフィルターを通った光の強さは3刺激値と相関するので，第1の方法のように分光計算という複雑な手間を省略することができる。当研究では第2の方法によって測色を行った。

濃度測定および測色に使用した測定装置は自動色彩計 Quick Color Eye (ACM-4) でありこれは筆者らの希望にそって新しく開発されたものである。この測色計の特色は，カラーフィルムだけでなく，マルチスペクトルビューワーのスクリーン上でカラー画像を直接測色できることである。さらに，3刺激値を表示するのではなく，色度座標値 x, y と刺激値 Y をディジタル表示できることである。Y はフィルム画像の光の透過率を与えるものであるから，これを(2)式によって変換することにより写真濃度の測定も可能である。

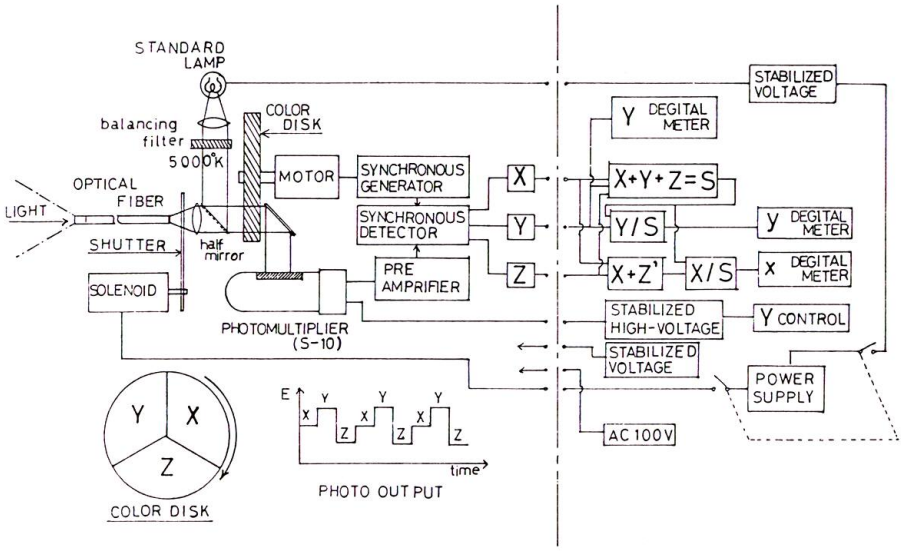
本装置は，顕微鏡，ファイバー，受光部，電源指示部の4点から構成されている。それらの外観を写真-5に，構造の概略を図-4に示す。

顕微鏡の試料台上のフィルムを透過した光束は，オプティカルファイバーを通って受光部に導かれる。そのさいに，顕微鏡の対物レンズの倍率と測定用スリ



写真—5 測色計 Quick color eye (ACM-4)

Photo 5. Quick color eye (ACM-4) colorimeter.



図—4 測色計 Quick Color Eye (ACM-4) のブロックダイアグラム

Fig. 4. Schematic diagram of Quick Color Eye (ACM-4) colorimeter.

ットの口径を変えることにより，測定口径を自由に変えることができる。また顕微鏡を取りはずし，ファイバーによってマルチスペクトルビューワーのスクリーン上の画像を直接測色することも可能である。受光部にはスペクトル3刺激値に対応する3枚のフィルターがあり，フィルターを透過した光は光電子増倍管で光電変換される。それらの信号は3刺激値に対応するもので，電源指示部において色度座標が計算され，Y, x, y がディジタルな値として表示される。

(3)　判別関数による樹種の判別と樹種識別に有効な波長帯域の組み合わせの判定

供試木あるいは供試プロットの写真色調の測定データから樹種を判別する方法についてその概略を述べる[16),61)]。多変量の説明変数から目的変数を予測する統計的方法として，説明変数も目的変数もともに数量として測定できる場合には重回帰分析法があり，説明変数は数量的なものであるけれども目的変数が質的なもので与えられる場合には判別関数法がある。したがって，波長帯域別の写真濃度，あるいはカラー写真上の測色データを説明変数とし，樹種という質的な目的変数を推定しようというこの場合には判別関数法が適用できる。

最初に，m 個の母集団（たとえば樹種）があり，それら集団の成員の特性が1変量（たとえばBバンドの写真濃度）で与えられている場合を考えてみる。その集団の分布は正規分布を仮定する。集団 g に対してその平均と分散をそれぞれ μ_g と σ_g^2 $(g=1, 2, \cdots, m)$ で表わせば，観測値 x の密度関数は

$$p_g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_g} e^{-\frac{1}{2\sigma_g^2}(x-\mu_g)^2} \quad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{7}$$

と与えられる。さて新たに得られた個体の観測値 x から，この個体をどの集団に所属すると判別するかは，x と各母集団の平均値 $\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_m$ との距離で考えるのが普通である。距離は統計的には平方距離

$$u^2 = \frac{(x-\mu_g)^2}{\sigma_g^2} \qquad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{8}$$

を用いる。

さて，集団の成員の特性が p 変量 $(p>1)$ で与えられている場合には，母集団の分布は p 次元正規分布を仮定する。このとき集団 g における観測値ベクトル $\boldsymbol{x}$ の確率密度関数は(7)式に代わって

$$p_g(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p\,|\Sigma_g|}} e^{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_g)'\,\Sigma_g^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_g)} \qquad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{9}$$

と表わされる。ただし $\boldsymbol{\mu}_g$ は $p\times1$ 母平均ベクトル，Σ_g は $p\times p$ 母分散・共分散行列であり，次の形に書かれる。

$$\boldsymbol{\mu}_g = \begin{pmatrix} \mu_{1g} \\ \mu_{2g} \\ \vdots \\ \mu_{pg} \end{pmatrix}, \qquad \Sigma_g = \begin{pmatrix} \sigma_{11(g)}^2 & \sigma_{12(g)}^2 & \cdots & \sigma_{1p(g)}^2 \\ \sigma_{21(g)}^2 & \sigma_{22(g)}^2 & \cdots & \sigma_{2p(g)}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{p1(g)}^2 & \sigma_{p2(g)}^2 & \cdots & \sigma_{pp(g)}^2 \end{pmatrix} \tag{10}$$

Σ_g^{-1} は Σ_g の逆行列，$|\Sigma_g|$ は Σ_g の行列式，$(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_g)'$ は $(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_g)$ の転置行列である。多変量の場合も (8) 式と同様のフォームで距離が定義できる。ここで

$$\Sigma_1 = \Sigma_2 = \cdots = \Sigma_m = \Sigma \tag{11}$$

を仮定すれば，どの集団に所属するのか不明な個体の観測値ベクトル $\boldsymbol{x}$ と各集団の平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_g$ $(g=1, 2, \cdots, m)$ との p 次元空間における距離は，次式のマハラノビスの距離 D_g によって表わされる。

$$D_g^2 = (\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_g)' \Sigma^{-1} (\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu}_g) \tag{12}$$

$\boldsymbol{x}$ はこの距離のもっとも小さい集団に所属すると考えるのが妥当である。(12) 式は Σ の対称性つまり

$$\Sigma' = \Sigma \tag{13}$$

なることを用いれば

$$D_g^2 = \boldsymbol{x}' \Sigma^{-1} \boldsymbol{x} - 2\left[\boldsymbol{\mu}_g' \Sigma^{-1} \boldsymbol{x} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_g' \Sigma^{-1} \boldsymbol{\mu}_g\right] \qquad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{14}$$

となり，この第 1 項はすべての集団に対して共通となり，$\boldsymbol{x}$ の判別には関係していない。よって (12) 式の最小のものを探すには (14) 式の第 2 項よりその符号を考慮して

$$L_g(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{\mu}_g' \Sigma^{-1} \boldsymbol{x} - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_g' \Sigma^{-1} \boldsymbol{\mu}_g \qquad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{15}$$

の最大のものを見つけ，その該当集団に $\boldsymbol{x}$ が属すると判定することになる。

いままでは判別関数に必要な母平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\mu}_2, \cdots, \boldsymbol{\mu}_m$ および共通の母分散・共分散行列 Σ は既知として扱ってきた。しかし実際問題ではこれらの母数を何らかの方法で標本から推定しなければならない。

いま母集団 g から無作為に n_g 個の標本がとられたとする。与えられた標本から母数 $\boldsymbol{\mu}_g$, Σ を推定する場合，これらの推定量としては通常不偏推定量が用いられる。つまり (15) 式において $\boldsymbol{\mu}_g$ の代わりに

$$\bar{\boldsymbol{x}}_g = \frac{1}{n_g} \sum_{l=1}^{n_g} \boldsymbol{x}_{gl} \qquad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{16}$$

を，Σ の代わりに

$$\boldsymbol{U} = \frac{1}{\sum_{g=1}^{m} n_g - m} \sum_{g=1}^{m} \sum_{l=1}^{n_g} (\boldsymbol{x}_{gl} - \bar{\boldsymbol{x}}_g)(\boldsymbol{x}_{gl} - \bar{\boldsymbol{x}}_g)' \tag{17}$$

を用いる。これにより (15) 式の判別関数を

$$l_g(\boldsymbol{x}) = \bar{\boldsymbol{x}}_g' \boldsymbol{U}^{-1} \boldsymbol{x} - \frac{1}{2} \bar{\boldsymbol{x}}_g' \boldsymbol{U}^{-1} \bar{\boldsymbol{x}}_g \qquad (g = 1, 2, \cdots, m) \tag{18}$$

で推定すればよい。

つぎに，樹種識別に有効な波長帯域の組み合わせを判定する手順について説明する。検討した波長帯域は青 (B)，緑 (G)，赤 (R)，近赤外 (IR) の4つであり，II-1 で述べたように，試験地を対象としてこれら4波長帯域のマルチスペクトル写真が撮影されている。波長帯域の組み合わせとしては，これら4つの波長帯域をすべて用いる組み合わせ (B×G×R×IR のように表わす) が1通り，3つの波長帯域を用いる組み合わせが B×G×R，B×G×IR，B×R×IR，G×R×IR の4通り，2つの波長帯域を用いる組み合わせが B×G，B×R，B×IR，G×R，G×IR，R×IR の6通り，合計11通りが考えられる。そこでこれらの波長帯域組み合わせについて樹種識別の効果を客観的に比較し，最適の波長帯域組み合わせを見出そうというのである。そのさいに，撮影高度 500 m と 1,000 m のマルチスペクトル写真と供試木を用いて単木の樹種識別について，撮影高度 2,000 m のマルチスペクトル写真と供試プロットを用いて林分の樹種識別について検討した。たとえば撮影高度 500 m の B×G×R という波長帯域組み合わせについては，B バンド，G バンド，R バンドのポジフィルム上の供試木の画像濃度を説明変数とし，供試木の樹種を目的変数として，9樹種にわたる供試木 257 本から (18) 式のような判別関数を構成する。これを用いて 257 本の供試木の樹種を判別し，その樹種が正しく判別できた供試木数の全供試木数に対する比を求める。この比を判別的中率と呼ぶことにする。11通りの波長帯域組み合わせについて判別的中率を求めるならば，この的中率が高い波長帯域組み合わせほど樹種識別に有効であると推定できる。同様にして，撮影高度 1,000 m についても9樹種にわたる供試木 257 本を，撮影高度 2,000 m については6樹種群にわたる供試プロット 100 点を用いて，11通りの波長帯域組み合わせごとに判別関数を計算したのち判別的中率を求める。こうして撮影高度ごとに樹種識別に有効な波長帯域組み合わせを客観的，定量的に判定する。この判別分析には多変量解析プログラム MULVA/X を使用した。

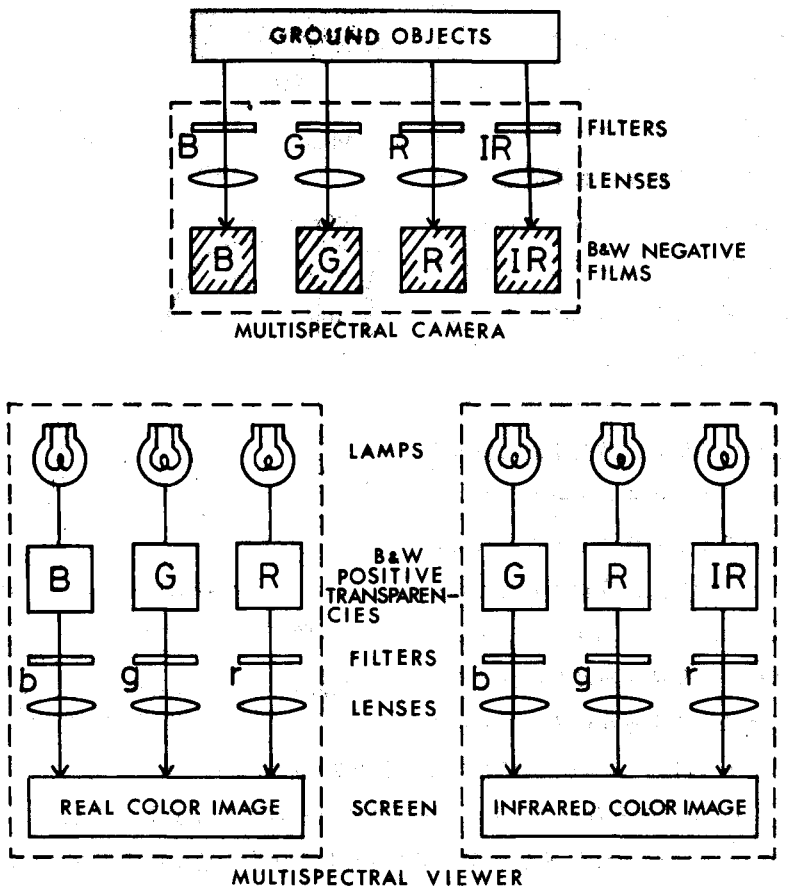
ところで本論文においては，判別関数によって樹種を判定することを樹種の「判別」と呼んでいる。一方「判読」は，写真上に写っている各種の物の像を観察して適切な判断を与え，そのものを判定することを指し，各種の目的のためにいろいろの形態で行われている作業の総称であって，これまできわめて広い意味に用いられてきた[41),67)]。筆者はこれを広義の判読とし，一方，被写体が何であるかを識別しその意味や内容を判断することを目的にして，航空写真上でその手掛かりとなる写真像の構成要素，すなわち色調，形状，パタン，きめ，位置など (これらを判読要素と呼ぶ) を調べることを狭義の「判読」とした。判別や狭義の写真判読の結果と既知の知識 (生態的データなど) を総合して解釈を行い，被写体の内容，たとえば樹種の「識別」や地位の判定という目的を達成するのである。そしてこれらの作業全体が広義の判読になるわけである。

(4) カラー写真の合成と識別効果の検証

樹種識別に有効な波長帯域組み合わせを判定したのは，この波長帯域に感光する乳剤層を組み合わせたカラーフィルムが，樹種識別に有効であると予測したからである。そこで筆者の

この予測が正しいかどうかを検証することにした。そのためには感光乳剤層組み合わせを異にする各種のカラーフィルムで撮影したカラー写真を比較する必要がある。これらの中には当然未開発のカラーフィルムも含まれてくる。しかし，これらのカラーフィルムによってえられるカラー写真と同等の画像が，加法混色によってマルチスペクトル写真から合成することができる。本研究ではこのマルチスペクトルカラー写真を用いて，樹種識別に有効なカラーフィルムの種類を検討する。

マルチスペクトルカラー写真法の原理を図解すると図-5のようになる。マルチスペクトルカメラによって撮影されたB, G, R, IRバンドの白黒ネガフィルムから，B, G, R, IRバンドの4枚の白黒ポジフィルムを作成する。このうちB, G, Rの各波長帯域のポジフィルムを，それぞれ青，緑，赤の3原色の光でスクリーン上に投影し重ね合わせると，リアルカラーフィルムで撮影したのと同等のカラー画像がえられる。このような波長帯域と投影色光の組み合わせをB×G×R (b×g×r) と表わすことにする。またG, R, IRバンドのポジフィルムを，それ

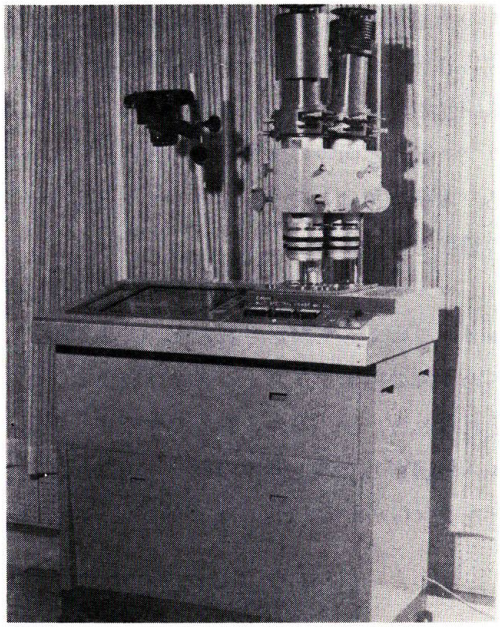


図—5 マルチスペクトルカラー写真法の原理

Fig. 5. Principle of multispectral color photography.

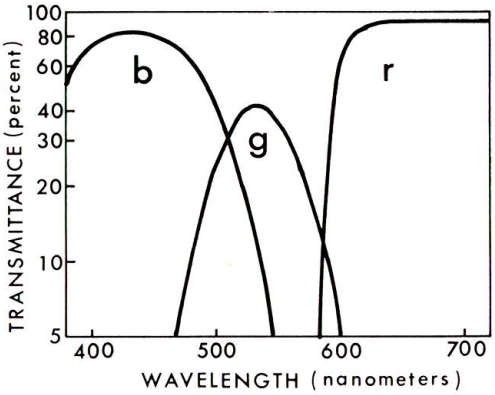
ぞれ青，緑，赤の色光によって投影すれば，すなわち G×R×IR (b×g×r) は赤外カラーフィルムと同様なカラー画像となる。

カラー画像を合成するのに用いた投影装置は，キャノンマルチスペクトルビューワーMSV-300である。このビューワーでは，フィルムカセットに装填した3枚の白黒ポジフィルムがランプで照射され，フィルター，投影レンズを経た光はミラーで反射されて，各波長帯域の画像がスクリーン上で合成される。フィルム中心と投影レンズ中心を通る軸線3本が，スクリーン上1点で交わるよう配置されているからである。フィルターは画像解析に適したものを選んで装着する。投影レンズにはピント調節リングと絞りリングがあり，ピント調節，光量調節に使用する。投影倍率は5倍であり，合成画像は必要に応じてカメラで撮影記録できるようになっている[33]。写真-6にマルチスペクトルビューワーの外観を，図-6に3原色光をえるために用いたフィルターの分光透過曲線を示す。



写真—6　キャノンマルチスペクトルビューワー MSV-300

Photo 6. Canon MSV-300 multispectral viewer.



図—6　カラー画像の合成に使用したフィルターの分光透過曲線

Fig. 6. Spectral transmission curves of filters for multispectral viewer.

マルチスペクトルビューワーによってカラー画像を合成する場合，波長帯域の組み合わせとその投影色光の組み合わせが同じであっても，色光の光量を変化させることによって合成画像の色彩を無限に変化させることができる。したがってカラー画像を合成する場合，そこに何らかの基準を設けなければカラー写真間の樹種識別効果を比較することができない。この研究ではこのための基準として地上標準反射板を利用している。

B, G, R の3バンド組み合わせによってリアルカラー画像を合成する場合，マルチスペクトルビューワーのスクリーン上で，灰色の地上標準反射板の画像の色が白(無色)になるよう測色計で測色しながら3つの色光の光量を投影レンズの絞りで調節する。白の色度座標は $x=0.345$, $y=0.352$ としたが，これは合成画像が色温度 5,000°K の照明光で観察されるものとしたからで

ある。IR バンドを含む3バンド組み合わせでは，まず地上標準反射板が白となるように3つの投影色光の光量を調節したのち，IR バンドの色光の光量を3絞りだけ絞り込んで少なくした。これは緑色植物からの赤外線反射率が非常に高いため，標準反射板を白色にすると植物画像の色に IR バンドの投影色光の色が強く出すぎるからである。赤外カラーフィルムにおいて，赤外線に感光する乳剤層の感度を他の2つの感光層と比べて故意に低感度にしてあるのもこのためである[15]。2バンド組み合わせで合成する場合は，まずビューワーにポジフィルムを挿入せずに色光だけを投影し，スクリーン上が白色となるように3色光の光量を調節する。そののちに2枚のポジフィルムを挿入し，使用しない色光の光源を消すことによってカラー画像を合成した。

マルチスペクトルビューワーによって合成したカラー画像は，アサヒペンタックス6×7を用いてカラー・リバーサル・フィルム Kodak Ektachrome X に記録した。ビューワーの照明光の色温度がスクリーン上で3,600°K であるため，写真撮影のさいには色温度変換フィルターを用いてフィルムに適した色温度に変換し，適正なカラー再現がなされるようにした。このカメラの画面サイズは55×70 mm であり，マルチスペクトル写真の55×55 mm の画面が同じ大きさで撮影されるようにした。したがって記録されたカラー画像の縮尺はマルチスペクトル写真の撮影縮尺と同一になる。この記録写真をマルチスペクトルカラー写真と呼ぶことにする。

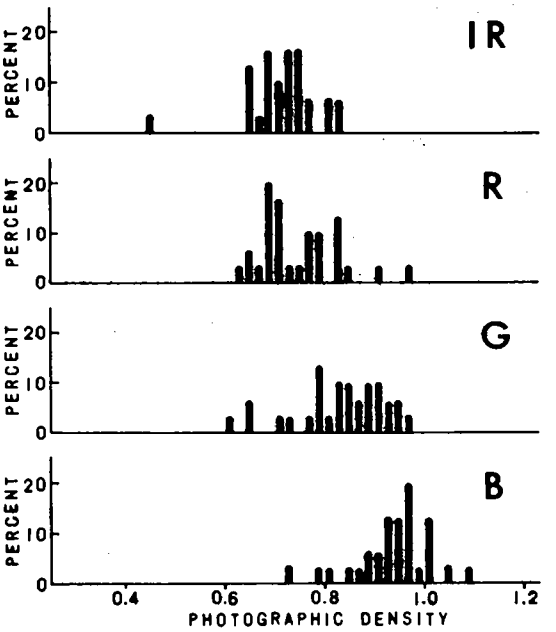
カラー写真の樹種識別の効果を比較するには，写真濃度によって波長帯域組み合わせの効果を比較した場合と同様の手法を用いる。まずマルチスペクトルカラー写真上の供試木あるいは供試プロットの画像の色を測色計によって測定する。そのさいにはカラーフィルムのベースの Y（透過率）を100％とし，測定した画像の Y を (2) 式によって濃度に，色度座標値 x, y を (6) 式によって u, v に変換した。この濃度および色度座標 u, v を説明変数とし，樹種を目的変数として判別関数を構成する。このときの判別的中率によってカラー写真間の樹種識別効果を客観的定量的に比較した。なおカラーフィルムの現像による発色の変動を除去するため，カラーフィルム（マルチスペクトルカラー写真）の測色のさいにはまず灰色の地上標準反射板の色度を測定し，これが白からはずれている場合には色温度変換フィルターを用いて白となるように補正したうえで測色を行っている。

III. 樹種識別に効果の高い波長帯域

1. 供試木・供試プロットの写真濃度

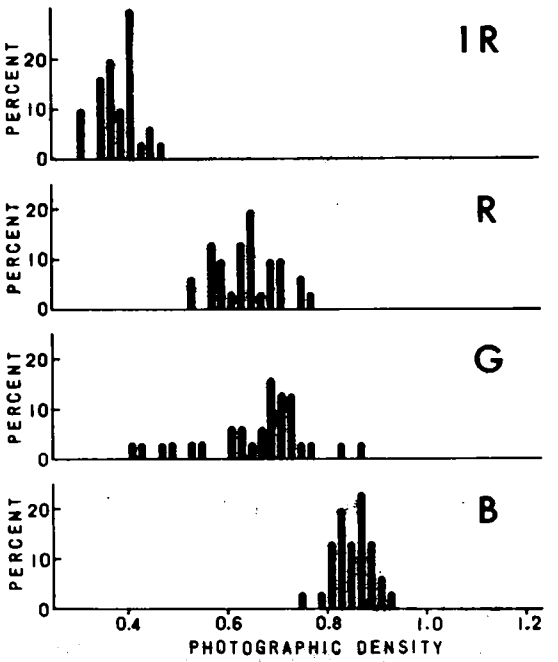
(1) 撮影高度 500 m（縮尺 1 : 5,000）

撮影高度 500 m のマルチスペクトル写真によって B, G, R, IR の各波長帯域ごとに表-4に示した供試木の画像濃度を測定した。供試木の樹冠の部分の透過率を自動色彩計を用いて測定し，これを (2) 式によって濃度に変換した。測定口径は白黒ポジフィルム（縮尺 1 : 5,000）上



図—7 トドマツの4波長帯域における写真濃度の度数分布 (撮影高度 500 m)

Fig. 7. Histgrams from *Abies sachalinensis* in four spectral bands (at flight altitude of 500 m).



図—8 ミズナラの4波長帯域における写真濃度の度数分布 (撮影高度 500 m)

Fig. 8. Histgrams from *Quercus mongolica* var. *grosseserrata* in four spectral bands (at flight altitude of 500 m).

で0.4 mmとしたが，これは地上で直径2 mの円に相当する。

濃度測定の結果から樹種別に写真濃度の度数分布を求めたが，この例としてトドマツとミズナラの場合を図-7と図-8に示す。これらは樹種の分光反射特性を反映しているはずであるが，樹種間でとくに顕著な差はみられなかった。しかし針葉樹種ではIRバンドにおける反射量が少ないためIRバンドの濃度が高く，逆に広葉樹種では反射量が多いため濃度が低くなっている。さらに広葉樹5樹種ではIR, R, G, Bバンドの順に濃度が高くなる，すなわち度数分布図で右下がりの傾向が明瞭に観察できるのにたいし，針葉樹4樹種では4バンドとも濃度に大差がみられず，どちらかといえば垂線をおろしたような様相を呈している。

図-9は，波長帯域ごとに樹種別の写真濃度の母平均を推定し，その95%信頼区間を図示したものである。これによって4波長帯域における樹種の濃度特性をみると，B, G, Rの3バンドが類似していることが一見してうかがわれる。IRバンドは他の3バンドとは傾向を異にしており，しかもこのバンドでは針葉樹と広葉樹の濃度に明らかな差が認められる。

(2)　撮影高度 1,000 m（縮尺 10,000）

撮影高度1,000 mのマルチスペクトル写真によって，B, G, R, IRの各バンドにおける供試木の画像濃度を測定した。この供試木は撮影高度500 mの写真の濃度測定に用いたものと全く同じものである。測定口径はフィルム（縮尺1:10,000）上で0.2 mmであり，撮影高度500 mの写真の場合と同じく地上で直径2 mの円に相当する。

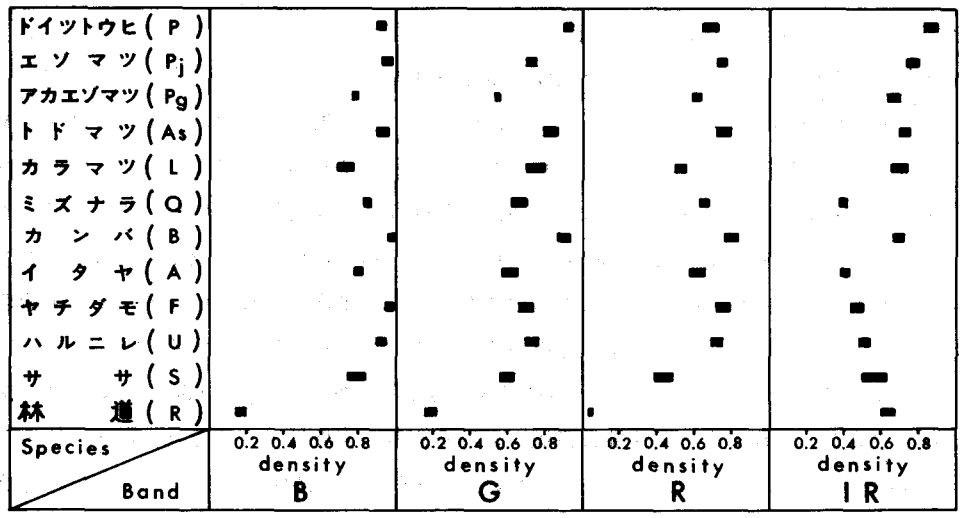
濃度測定結果から樹種別に写真濃度の度数分布を求めてみると，撮影高度500 mの場合ほど明らかではないが，これと類似した傾向がうかがわれる。さらに，樹種別に写真濃度平均値の95%信頼区間を推定すると図-10のようになる。ここでも撮影高度500 mの場合と同様の傾向が指摘でき，樹種の濃度特性はB, G, Rの3バンドで類似しているが，IRバンドでは他のバンドと異なる傾向を示す。しかし撮影高度1,000 mでは500 mの写真に比べ，樹種間の濃度のばらつきが可視部のB, G, Rの3バンドで小さくなり，コントラストの減少が推察される。

(3)　撮影高度 2,000 m（縮尺 1:20,000）

前述の撮影高度500 mと1,000 mの写真では，単木の樹種識別を検討することを目的として表-4に示した供試木の画像濃度を測定した。撮影高度2,000 mの写真についてもこの供試木の画像濃度を測定しようと試みたが，自動色彩計の顕微鏡を用いて画像を拡大しても供試木を識別することができなかった。したがって，撮影高度2,000 mの写真によって単木を識別することは不可能であると考え，この高度の写真では林分の樹種識別だけを検討することにした。

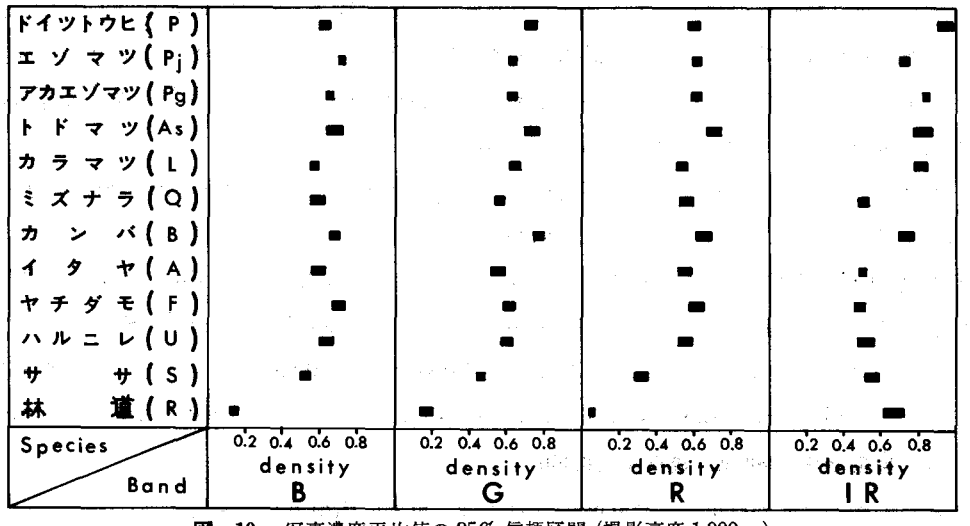
表-5に示した供試プロットについて，B, G, R, IRの各バンドにおける画像濃度を測定した。測定口径はフィルム（縮尺1:20,000）上で1.0 mmとしているが，これは地上で直径20 mの円に相当するものである。

図-11は樹種群別に濃度平均値の95%信頼区間を推定したものである。これによって樹種群の濃度特性をみれば，B, G, Rの3バンドでは類似したパタンを示すが，IRバンドでは



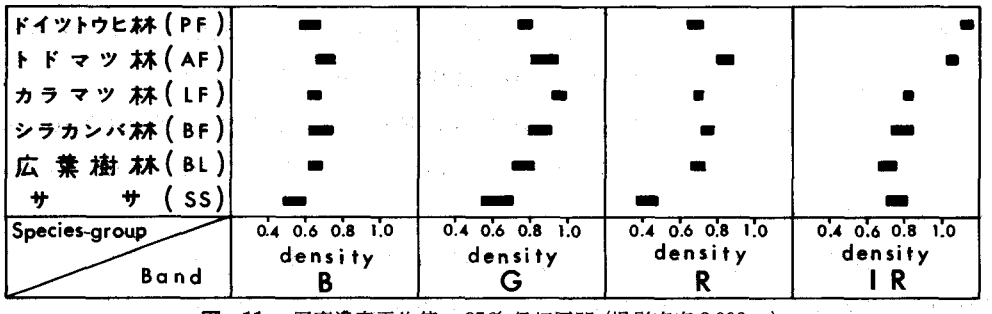
図—9 写真濃度平均値の95%信頼区間(撮影高度500 m)

Fig. 9. 95 percent confidence interval for the mean of photographic density (at flight altitude of 500 m).



図—10 写真濃度平均値の95%信頼区間(撮影高度1,000 m)

Fig. 10. 95 percent confidence interval for the mean of photographic density (at flight altitude of 1,000 m).



図—11 写真濃度平均値の95%信頼区間(撮影高度2,000 m)

Fig. 11. 95 percent confidence interval for the mean of photographic density (at flight altitude of 2,000 m).

それらと趣きを異にしている。さらにRバンドにおいてササの濃度が他の樹種群に比べて非常に低いことが特徴的である。また濃度の度数分布を求めてみると，ササはRバンドの濃度が他の3バンドの濃度よりも低くなっていた。このことは図-11からもうかがい知ることができる。

2. マルチスペクトル写真による樹種識別の可能性[79)]

マルチスペクトル写真は主として被写体のもつ分光反射特性を把握しようとするものである。カラーフィルムはマルチスペクトル写真の特別なタイプとして考えることができる[91)]。樹種の識別にマルチスペクトル写真を利用するにあたっては，樹種間で分光反射特性に差が存在していることが基本的な前提となっている。従来からかなりの樹種についてその樹葉の分光反射特性が調べられており，樹種によってその特性に差異のあることが報告されている[62),88)]。穀物についてはさらに詳しい分析がなされている。2,000枚以上の穀物の葉について分光反射率を測定して分散分析を行った結果，種類によって分光反射率に高度の有意差のあることが知られた[36)]。

前述した諸報告は1枚1枚の葉を扱うような実験室的なものである。ところが航空写真においては，大気による反射光の散乱や，樹形に応じて多数の葉が空間的に重なることによって複雑な構造をもつ樹冠あるいは林冠からの反射光を問題にしなければならない。しかしこの種の問題についてはわが国においてこれまでほとんど調査がなされておらず，今後の課題といえる。そこで筆者は，航空写真を撮影するような上空においても，樹種によって分光反射特性に差がみられるかどうか，すなわち，マルチスペクトル写真によって樹種を識別する可能性があるのかどうかを検討した。

撮影高度1,000 m（撮影縮尺1:10,000）のマルチスペクトル写真を使用し，9樹種についてそれぞれ30本の標本をとってその画像の濃度を測定した。そして樹種間，波長帯域間で濃度に有意差がみられるかどうかを検定するため二元配置の分散分析を行った。その結果を示したのが表-9であり，樹種間においても，波長帯域間においても危険率0.1%で有意差のあることが認められる。これは各樹種が他の樹種とそれぞれ分離できることを意味するのではなく，単に

表—6　分散分析表

Table 6.　Analysis of variance

要因 Factor	SS	d.f.	V	F
樹種間 (T)	5.5855	8	0.6981	95.2061***
波長帯域間 (S)	2.3868	3	0.7956	108.4897***
T×S	4.2037	24	0.1751	23.8841***
残差 Error	7.6562	1044	0.0073	
全体 Total	19.8323	1079		

T: Between tree species　S: Between spectral band
***: 0.1% 水準で有意　Significant at 0.1% level

統計学的に有意の変動が樹種間や波長帯域間に存在することを示すにすぎない。しかし，少なくともここからマルチスペクトル写真による樹種識別の可能性をうかがい知ることができる。

3. 写真濃度による樹種の判別と樹種識別に効果的な波長帯域の組み合わせ

(1) 撮影高度 500 m (縮尺 1 : 5,000)

ドイツトウヒ (P), エゾマツ (Pj), トドマツ (As), カラマツ (L), ミズナラ (Q), カンバ (B), イタヤ (A), ヤチダモ (F), ハルニレ (U) の9樹種にわたる供試木257本によって，波長帯域別の写真濃度を説明変数，樹種を目的変数として判別関数を構成した。その場合，4つの波長帯域のうち使用する波長帯域組み合わせをいろいろ変えて解析を行っている。

B, G, R, IR バンドの写真濃度をすべて用いた (B×G×R×IR のように表わす) 場合，さきの (18) 式に示した判別関数の係数を求めると表-7のようになった。したがって，判別関数は (19) 式となり，そのうちの最大のものを見つけ，その該当樹種に供試木が属していると判定されることになる。

表—7　判別関数の係数の例 (B×G×R×IR, 撮影高度 500 m)

Table 7.　An example of discriminant function coefficients (B×G×R×IR, at flight altitude of 500 m)

Group	変数 Variable B band	G band	R band	IR band	定数 constant
P	215.747	22.387	−54.076	91.449	−130.010
Pj	243.115	−15.091	−29.286	71.988	−126.991
As	228.394	16.434	−24.737	43.277	−119.577
L	183.294	18.916	−52.141	73.837	− 87.586
Q	239.309	23.868	−11.619	−40.930	− 97.424
B	241.203	30.187	−21.170	20.148	−130.213
A	229.251	14.949	−14.280	−24.283	− 88.395
F	275.952	11.172	−10.471	−33.314	−126.243
U	250.590	18.600	−14.504	−16.360	−112.838

$$\left.\begin{aligned}
l_{\mathrm{P}}(x) &= 215.747\,x_{\mathrm{B}}+22.387\,x_{\mathrm{G}}-54.076\,x_{\mathrm{R}}+91.449\,x_{\mathrm{IR}}-130.010\\
l_{\mathrm{Pj}}(x) &= 243.115\,x_{\mathrm{B}}-15.091\,x_{\mathrm{G}}-29.286\,x_{\mathrm{R}}+71.988\,x_{\mathrm{IR}}-126.991\\
l_{\mathrm{As}}(x) &= 228.394\,x_{\mathrm{B}}+16.434\,x_{\mathrm{G}}-24.737\,x_{\mathrm{R}}+43.277\,x_{\mathrm{IR}}-119.577\\
l_{\mathrm{L}}(x) &= 183.294\,x_{\mathrm{B}}+18.916\,x_{\mathrm{G}}-52.141\,x_{\mathrm{R}}+73.837\,x_{\mathrm{IR}}-\ 87.586\\
l_{\mathrm{Q}}(x) &= 239.309\,x_{\mathrm{B}}+23.868\,x_{\mathrm{G}}-11.619\,x_{\mathrm{R}}-40.930\,x_{\mathrm{IR}}-\ 97.424\\
l_{\mathrm{B}}(x) &= 241.203\,x_{\mathrm{B}}+30.187\,x_{\mathrm{G}}-21.170\,x_{\mathrm{R}}+20.148\,x_{\mathrm{IR}}-130.213\\
l_{\mathrm{A}}(x) &= 229.251\,x_{\mathrm{B}}+14.949\,x_{\mathrm{G}}-14.280\,x_{\mathrm{R}}-24.283\,x_{\mathrm{IR}}-\ 88.395\\
l_{\mathrm{F}}(x) &= 275.952\,x_{\mathrm{B}}+11.172\,x_{\mathrm{G}}-10.471\,x_{\mathrm{R}}-33.314\,x_{\mathrm{IR}}-126.243\\
l_{\mathrm{U}}(x) &= 250.590\,x_{\mathrm{B}}+18.600\,x_{\mathrm{G}}-14.504\,x_{\mathrm{R}}-16.360\,x_{\mathrm{IR}}-112.838
\end{aligned}\right\}\qquad(19)$$

ただし，x_{B}, x_{G}, x_{R}, x_{IR} はそれぞれ B, G, R, IR バンドのマルチスペクトル写真濃度である。

1例として，供試木 No. 1 の樹種を推定してみる。供試木 No. 1 の B, G, R, IR バンドに

おける濃度はそれぞれ 1.01, 0.95, 0.89, 1.11 であるので，(19) 式に $x_B = 1.01$, $x_G = 0.95$, $x_R = 0.89$, $x_{IR} = 1.11$ を代入すると

$$\left.\begin{aligned} l_P(x_1) &= 162.543 \\ l_{Pj}(x_1) &= 158.060 \\ l_{As}(x_1) &= 152.735 \\ l_L(x_1) &= 151.065 \\ l_Q(x_1) &= 111.180 \\ l_B(x_1) &= 145.604 \\ l_A(x_1) &= 117.685 \\ l_F(x_1) &= 116.783 \\ l_U(x_1) &= 126.859 \end{aligned}\right\} \tag{20}$$

となり，このうち最大のものを選択すると $l_P(x_1)$ となる。つまり，供試木 No. 1 は樹種 P（ドイツトウヒ）として正しく判別されたことになる。

同様にして全供試木の樹種を判別すると，表-8 に示すような結果をえた。この表中で対角線上の数値が各樹種の供試木のうち正しく判別された本数を示し，その本数を各樹種の供試木数合計で除したものが判別的中率である。例えばエゾマツ (Pj) は供試木 30 本中 27 本が正しく判別され，1 本がトドマツ (As) として，2 本がカラマツ (L) として誤って判別されたことを示し，その判別的中率は $\frac{27}{30} = 90.0\%$ である。9 樹種について判別的中率を求め，これらの平均値すなわち平均判別的中率を計算すると 70.5% となる。

表-9 は G, R, IR の 3 バンドの写真濃度によって判別関数を構成し，それによって供試木の樹種を判別した結果である。さらに，波長帯域組み合わせをいろいろ変えて，合計 11 通りの波長帯域組み合わせについてそれぞれ判別関数を構成し，供試木の樹種の判別を行った。そして波長帯域組み合わせごとに 9 樹種の平均判別的中率を計算した結果が表-18 中の撮影高度 500 m の欄に示されている。

これによれば，B, G, R, IR の 4 バンドの写真濃度をすべて使った場合の 9 樹種の平均判別的中率は 70.5% であるのに対し，B, G, IR の 3 バンドを使った場合のそれは 70.9% である。すなわち，3 バンド組み合わせと 4 バンド組み合わせの間には樹種判別の効果に差がみられない。かえって 4 バンドの場合よりも 3 バンドの場合の方が若干的中率が高くなっている。このように，マルチスペクトル写真によって樹種識別を行う場合には，必ずしも使用する波長帯域数が多ければ良いとはいえず，有効な波長帯域の組み合わせを選定することが重要となる。

図-9 によって樹種別写真濃度の平均値をみると，IR バンドでは針葉樹と広葉樹の濃度差が大きく，IR バンドだけでほぼ両者の区分が可能であることを示している。ただ広葉樹でもカンバは濃度が高く，針葉樹に近いといえる。さらに平均濃度の順序関係のパタンを図-9 で観察すると，可視光線領域の 3 波長帯域におけるそれは比較的似ており，とくに B バンドと R バンドのパタンが類似している。このように類似の傾向をもつ波長帯域を組み合わせてもその

表—8 写真濃度による供試木の判別結果の例 (B×G×R×IR, 撮影高度 500 m)

Table 8. Example of discrimination results of sample trees (B×G×R×IR, at flight altitude of 500 m)

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U		
P	23	0	4	3	0	0	0	0	0	30	76.7
Pj	0	27	1	2	0	0	0	0	0	30	90.0
As	2	1	17	1	0	8	1	0	0	30	56.7
L	2	0	0	19	0	0	0	0	0	21	90.5
Q	0	0	0	0	20	0	8	2	0	30	66.7
B	0	0	7	0	0	22	0	0	1	30	73.3
A	0	0	0	0	8	0	19	1	2	30	63.3
F	0	0	0	0	1	0	1	20	4	26	76.9
U	0	0	2	0	3	3	3	7	12	30	40.0

表—9 写真濃度による供試木の判別結果の例 (G×R×IR, 撮影高度 500 m)

Table 9. Example of discrimination results of sample trees (G×R×IR, at flight altitude of 500 m)

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U		
P	19	2	4	5	0	0	0	0	0	30	63.3
Pj	0	28	2	0	0	0	0	0	0	30	93.3
As	3	3	19	0	0	4	1	0	0	30	63.3
L	3	0	0	18	0	0	0	0	0	21	85.7
Q	0	0	0	0	18	0	8	3	1	30	60.0
B	0	0	8	0	0	21	0	0	1	30	70.0
A	0	0	0	0	9	0	17	1	3	30	56.7
F	0	0	0	0	2	0	1	16	7	26	61.5
U	0	0	2	0	4	3	5	7	9	30	30.0

表—10 波長帯域間写真濃度の相関行列 (撮影高度 500 m)

Table 10. Corelation matrix between density on spectral band photographs (at flight altitude of 500 m)

波長帯域 Spectral band	B	G	R	IR
B	1.000	0.486	0.814	0.362
G	0.486	1.000	0.447	0.707
R	0.814	0.447	1.000	0.308
IR	0.362	0.707	0.308	1.000

効果はあまり期待できない。実際に表-18に示されるように，B, G, R の3バンドによって樹種を判別してみるとその的中率は，R×IR, G×IR, B×IR の2バンド組み合わせの場合よりも低くなり，さらに B×R は11通りの組み合わせの中で最低となる。B×G×R はリアルカラーフィルムと同じ波長帯域組み合わせであり，したがって樹種識別にとってリアルカラー写真は，撮影が夏期である場合には有効でないことを示唆している。そして IR を含む2バンド組み合わせの的中率が高いのは，異なる傾向をもつ波長帯域を組み合わせた場合に，その識別効果が大きいことを示すものであろう。

波長帯域間の写真濃度の関係をより客観的に検討するため，9樹種の全供試木について波長帯域間の濃度の相関行列を求め，表-10に示した。この表からも B バンドと R バンドの相関が最も高いことがわかる。このような場合，どちらの波長帯域を使用するのが有効であるかという問題が生じる。そこで樹種を識別する場合の波長帯域の有効性を判断するための1つの指標として，9樹種について波長帯域別に写真濃度の「級間不偏分散/級内不偏分散」を調べてみた結果が表-17中の撮影高度500 m の欄に示されている。

この表からも明らかなごとく IR バンドの分散化がきわめて大きく，このバンドが樹種識別に有効であることが推察される。B バンドと R バンドを比べると B バンドの分散がかなり大きく，R バンドよりも有効である。実際に B×IR と R×IR の平均判別的中率を比べてみると，それぞれ60.9%，55.3% であり，R バンドよりも B バンドと組み合わせるほうが有効である。また，G バンドの分散比がかなり高いため G×IR の組み合わせが有効と考えられるが，その平均判別的中率を表-18でみると，B×IR や R×IR よりも低くなっている。これは表-10に示されるように，IR バンドとの相関が G バンドでは他に比べてかなり大きいためと思われる。

以上の考察から，分散比が大きく，しかも相関の小さい波長帯域を組み合わせることが，樹種識別に効果的であることを特に指摘しておきたい。さらに，夏期に低高度 (約500 m) で撮影した写真から樹種識別を行う場合は，リアルカラー写真 (B×G×R) はあまり有効でない。むしろ赤外カラー写真 (G×R×IR) のほうが適しているといえる。また B, G, IR の3バンドを感光層とするカラーフィルムを開発するならば，樹種識別に効果的であると推測できる。

(2) 撮影高度 1,000 m (縮尺 1 : 10,000)

撮影高度 1,000 m のマルチスペクトル写真について，波長帯域の組み合わせを変えて写真濃度から判別関数を構成し，供試木の樹種判別を行った。その判別結果の例を表-11と表-12に示す。さらに，11通りの波長帯域組み合わせについて平均判別的中率を求めた結果が表-18中の撮影高度 1,000 m の欄に示されている。

樹種別写真濃度の平均値を図-10によってみると，可視光線領域の B, G, R の3バンドが類似の傾向をもっていることがわかる。IR バンドはこれらの3バンドとは趣きを異にしており，特に針葉樹類と広葉樹類の濃度差が明瞭である。このことから，樹種の識別には IR バンドが有効であることがうかがえる。

表—11 写真濃度による供試木の判別結果の例 (B×G×R×IR, 撮影高度 1,000 m)

Table 11. Example of discrimination results of sample trees (B×G×R×IR, at flight altitude of 1,000 m)

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U		
P	23	0	0	6	0	1	0	0	0	30	76.7
Pj	0	28	0	1	0	1	0	0	0	30	93.3
As	1	7	17	1	1	2	1	0	0	30	56.7
L	4	1	0	16	0	0	0	0	0	21	76.2
Q	0	2	0	0	6	0	12	6	4	30	20.0
B	2	0	1	0	0	24	0	1	2	30	80.0
A	0	0	0	0	5	0	14	10	1	30	46.7
F	0	1	0	0	2	0	0	18	5	26	69.2
U	0	1	0	0	3	2	0	9	15	30	50.0

表—12 写真濃度による供試木の判別結果の例 (G×R×IR, 撮影高度 1,000 m)

Table 12. Example of discrimination results of sample trees (G×R×IR, at flight altitude of 1,000 m)

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U		
P	24	0	0	5	0	1	0	0	0	30	80.0
Pj	0	21	4	3	0	1	1	0	0	30	70.0
As	1	8	17	0	0	2	2	0	0	30	56.7
L	4	2	0	15	0	0	0	0	0	21	71.4
Q	0	2	0	0	7	0	11	6	4	30	23.3
B	2	0	1	0	0	24	0	1	2	30	80.0
A	0	0	0	0	6	0	13	7	4	30	43.3
F	0	1	0	0	1	0	2	17	5	26	65.4
U	0	1	0	0	1	2	5	7	14	30	46.7

表—13 波長帯域間写真濃度の相関行列 (撮影高度 1,000 m)

Table 13. Corelation matrix between density on spectral band photographs (at flight altitude of 1,000 m)

波長帯域 Spectral band	B	G	R	IR
B	1.000	0.457	0.640	0.125#
G	0.457	1.000	0.752	0.735
R	0.640	0.752	1.000	0.411
IR	0.125#	0.735	0.411	1.000

1% 水準で有意差なし Not significant at 1% level

波長帯域間の関連をさらに深くみるために，9樹種の供試木257本によって波長帯域間の写真濃度の相関行列を求めた。これは表-13に示されているごとく，GバンドとRバンド，GバンドとIRバンドの相関が高く，BバンドとIRバンドの相関が非常に低い。

樹種識別に有効な波長帯域を推測するため9樹種の供試木257本により，級間不偏分散と級内不偏分散の比をとった結果を表-17の撮影高度1,000 mの欄に示した。この表から，IRバンドが樹種識別に非常に有効であり，Gバンドがそれに次ぐことが知られる。B, Rの両バンドはあまり有効ではなさそうである。しかも表-13よりこの両バンドの相関がかなり高いことから，B×Rバンドの組み合わせは樹種識別には不適当であるといってよい。この予測は，表-18の1,000 mの欄をみればB×Rの平均判別的中率が26.3%と最低になっていることから実証されたといえる。

表-17中の撮影高度1,000 mの欄に示した分散比の大きいIRバンドとGバンドを組み合わせた場合の平均判別的中率は49.2%となり，両バンド間の相関係数が高いにもかかわらず，2バンド組み合わせ中で最大となっている。波長帯域間の相関係数が最も小さいBバンドとIRバンドを組み合わせた場合の平均判別的中率がG×IRのそれに次いでおり，何よりも分散比の大きい波長帯域を組み合わせるのが識別に有効であることを示している。

リアルカラーフィルムに相当する波長帯域組み合わせであるB×G×Rは，G×IR, B×IR, R×IRの2バンド組み合わせの場合よりも的中率が低くなっている。これはBバンドとRバンドの分散比がIRバンドに比べて非常に小さいうえに，GとR，BとRのバンド間の相関も高いためであろう。一方，赤外カラーフィルムの3層の乳剤層が感光するG, R, IRバンドを組み合わせた場合の平均判別的中率は59.6%となり，4バンドすべてを使用した場合の63.2%よりは少し劣るが，その他のバンド組み合わせの中では最も効果的である。すなわち，夏期における樹種識別は，リアルカラー写真よりも赤外カラー写真に大きく期待しうることがわかる。

(3) 撮影高度2,000 m（縮尺1：20,000）

ドイツトウヒ林(PF)，トドマツ林(AF)，カラマツ林(LF)，シラカンバ林(BF)，広葉樹林(BL)，ササ(SS)の6樹種群について供試プロットのマルチスペクトル写真濃度から判別関数を構成した。これによって供試プロットの樹種群を判別した例を表-14と表-15に示す。さらに波長帯域組み合わせごとに6樹種群の平均判別的中率を計算した結果を表-18中の撮影高度2,000 mの欄に示した。

表-16は，6樹種群の供試プロット100点について波長帯域間の写真濃度の相関行列を示したものである。この表から，B, G, Rの3バンド間においては互いに相関の高いことが知られる。一方，IRバンドと他の3バンドとの相関は非常に低く，とくにIRバンドとBバンド，IRバンドとGバンドの間では相関関係はないといってよい。以上のことは，図-11の樹種群別写真濃度平均値のパタンをみることによっても容易に推察できる。

さらに，6樹種群について，波長帯域別に写真濃度の級間不偏分散と級内不偏分散の比を

調べると表-17の右欄の結果となった。これによれば波長の長いバンドほど分散比が高くなり樹種群の識別に有効である。したがって，波長の長いバンドを組み合わせることが樹種群の識別に適していると考えてよい。

表—14 写真濃度による供試プロットの判別結果の例
(B×G×R×IR, 撮影高度 2,000 m)

Table 14. Example of discrimination results of sample plots
(B×G×R×IR, at flight altitude of 2,000 m)

真の樹種群 Tree species group	判別による樹種群 Number of sample plots classified into						計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	PF	AF	LF	BF	BL	SS		
PF	15	0	0	0	0	0	15	100.0
AF	2	13	0	0	0	0	15	86.7
LF	0	0	15	0	0	0	15	100.0
BF	0	0	0	8	2	0	10	80.0
BL	0	0	0	10	20	0	30	66.7
SS	0	0	0	0	0	15	15	100.0

表—15 写真濃度による供試プロットの判別結果の例
(G×R×IR, 撮影高度 2,000 m)

Table 15. Example of discrimination results of sample plots
(G×R×IR, at flight altitude of 2,000 m)

真の樹種群 Tree species group	判別による樹種群 Number of sample plots classified into						計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	PF	AF	LF	BF	BL	SS		
PF	14	1	0	0	0	0	15	93.3
AF	3	12	0	0	0	0	15	80.0
LF	0	0	15	0	0	0	15	100.0
BF	0	0	0	9	1	0	10	90.0
BL	1	0	0	9	20	0	30	66.7
SS	0	0	0	0	0	15	15	100.0

表—16 波長帯域間写真濃度の相関行列 (撮影高度 2,000 m)

Table 16. Corelation matrix between density on spectral band photographs (at flight altitude of 2,000 m)

波長帯域 Spectral band	B	G	R	IR
B	1.000	0.653	0.789	0.052#
G	0.653	1.000	0.785	0.095#
R	0.789	0.785	1.000	0.259
IR	0.052#	0.095#	0.259	1.000

1% 水準で有意差なし Not significant at 1% level

表-18 中の高度 2,000 m の欄をみると，B×G×R×IR の 4 バンド組み合わせの平均判別的中率は 88.9%，G×R×IR のそれは 88.3% であり，両者の間には差がみられず，B バンドを使用する効果はほとんどない。また，B×G, B×R, B×IR, B×G×IR のように B バンドを含む組み合わせの場合の的中率はすべて低くなっている。なかでも B と G の両バンドは分散比も低く，しかもバンド間の相関も比較的高いので，B×G の組み合わせによる判別的中率は全組み合わせの中で最低である。B バンドは波長が短いため大気による散乱の影響が大きく，このように高い高度から撮影される場合には，樹種識別にとって B バンドの有効性は非常に小さいと結論できる。一方，長波長の 2 バンドを組み合わせた R×IR の平均判別的中率は 81.1% と高い値を示す。この 2 バンドに B バンドを加えて B×R×IR としても的中率は全く向上しない。また，リアルカラーフィルムに相応する波長帯域組み合わせの B×G×R の平均判別的中率は 76.1% である。これは赤外カラーフィルムに相応する G×R×IR の 88.3% に比べて大きく劣り，R×IR という 2 バンド組み合わせの的中率よりもさらに低い。

撮影高度が 2,000 m と高くなる縮尺 1 : 20,000 では，4 バンドをすべて使用する場合と，B バンドを除いた場合との樹種識別の効果の差はないといえる。したがって G×R×IR の 3 バンド組み合わせの効果が大きく，さらに R×IR という長波長の 2 バンド組み合わせによるものも非常に効率的であることがわかる。

4. 撮影高度と樹種識別

同一試験地を対象に，撮影高度を変えて，縮尺 1 : 5,000, 1 : 10,000, 1 : 20,000, の 3 種類のマルチスペクトル写真を撮影したのは，撮影高度が樹種識別に与える影響について検討するためであった。これまでそれぞれの撮影高度ごとに，樹種識別に効果的な波長帯域の組み合わせに触れたが，ここでは撮影高度間の比較を行い，撮影高度と樹種識別の関係について考察する。

表-17 は，3 種類の撮影高度の写真について，波長帯域別に濃度の級間不偏分散と級内不偏分散の比を一覧にしたものである。高度 500 m と 1,000 m では表-4 に示した 257 本の供試木を用いて 9 樹種について，高度 2,000 m では表-5 に示した供試プロット 100 点を用いて 6 樹種群について分散比を調べたものである。これをみると撮影高度を問わず IR バンドの分散比が最大であり，樹種識別に効果の大きいことが知られる。一方，B バンドのそれは高度 5,000 m では 4 バンドの中で

表—17 写真濃度の分散比

Table 17. Variance ratio of photographic density

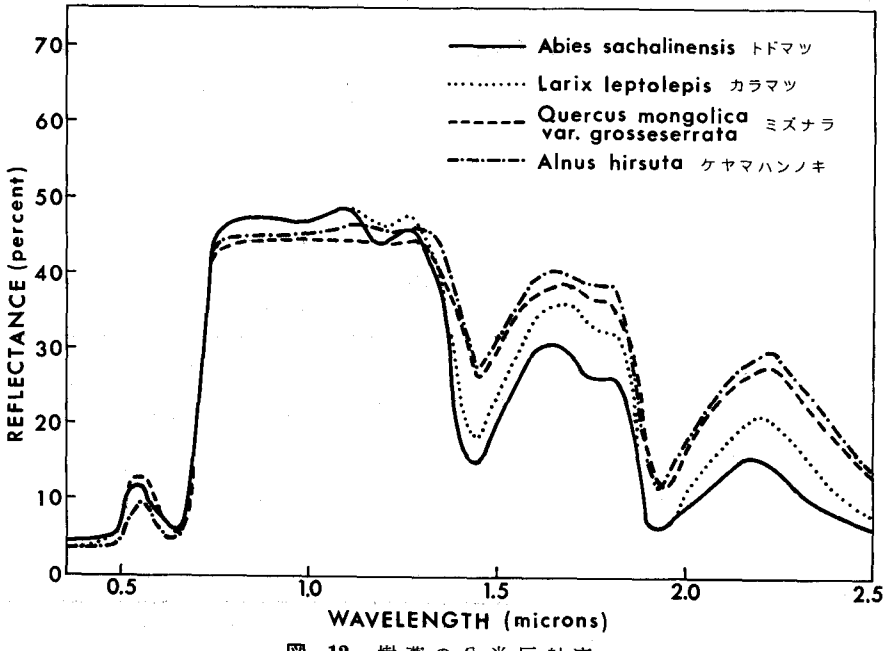
波長帯域 Spectral band	撮影高度 Flight altitude above ground		
	500 m	1,000 m	2,000 m
B	40.720	12.052	6.206
G	42.471	32.493	13.325
R	26.965	10.252	44.397
IR	170.322	110.422	85.333

注）撮影高度 500 m と 1,000 m は供試木 257 本について，撮影高度 2,000 m は供試プロット 100 点について計算した。

中位の大きさであるが，高度1,000 mになると小さくなり，高度2,000 mでは最小となる。すなわち，撮影高度が低い場合にはBバンドが有効であるが，それが高くなるつれてBバンドの有効性は減少する。

樹種別写真濃度平均値のパタンを図-9，図-10，図-11によって比較すると，どの撮影高度においても可視光線領域のB, G, Rの3バンドが類似しており，IRバンドがそれらと傾向を異にすることを知る。したがって類似の傾向を有するB, G, Rの3バンド組み合わせは，樹種識別において大きな効果を期待できない。またこの3バンドでは，単木としても林分としても，濃度による針葉樹と広葉樹の区分は不可能であるが，IRバンドでは両者の濃度差が大きく，この区分に対する効果の大きいことがわかる。

IRバンドが樹種識別にとって非常に効果の高いことは前述のとおりであるが，それは何にもとづくものであるかを考察してみる。図-12はいくつかの樹種について筆者が測定した樹葉の分光反射率を示したものである。ミズナラ，ケヤマハンノキについては緑葉1枚の反射率を，トドマツ，カラマツについては針葉を隙間のできないように並列してその反射率を，分光光度計 (Beckman DK-2) を用いて測定している。図-12をみると，1枚の葉の分光反射率は，フイルムの感光領域では樹種によってそれほど大きな差はない。ところが同種類の葉(ワタ)を重ねた場合の分光反射率を調べた報告[9]によれば，葉を重ねると可視光線領域の反射はほとんど変化しないが，近赤外線領域で大きく変化している。近赤外線領域での反射率は，2枚の葉を重ねた場合には20%近く増大し，5枚の葉を重ねると30%以上も増大するのである。これは



図—12　樹葉の分光反射率
Fig. 12. Spectral reflectances of foliage.

葉の近赤外光線に対する透過率が高く，透過した光が下層の葉により反射され，再び透過して反射光になるものと考えらる[12]。樹木は多くの葉が空間的に互いに重なり合って1つの樹冠を構成しているが，葉のつき方や樹形には樹種よって一定の傾向がみられる。したがって，葉の空間的重なりの構造は樹種によって異なり，針葉樹と広葉樹による差は非常に大きい。IRバンドにおいては，このような構造の違いによる近赤外線反射量の差を捉えることができるので，樹種識別に対する効果が大であると考えることができる。赤外線写真が森林の垂直的構造を知る上で有効なことは，すでに筆者らによって報告されている[78]。

表—18　平均判別的中率

Table 18. Average classification accuracy

波長帯域組み合わせ Spectral band combination	平均判別的中率 Average classification accuracy 撮影高度 Flight altitude above ground 500 m (%)	1,000 m (%)	2,000 m (%)
B×G×R×IR	70.5	63.2	88.9
B×G×R	49.8	40.0	76.1
G×R×IR	64.9	59.6	88.3
B×R×IR	63.0	54.1	81.1
B×G×IR	70.9	58.5	67.2
R×IR	55.3	44.9	81.1
G×IR	53.6	49.2	75.0
B×IR	60.9	45.5	66.1
G×R	43.7	34.5	73.3
B×R	33.3	26.3	61.1
B×G	47.4	32.3	47.8

注）撮影高度500 mと1,000 mは供試木について，撮影高度2,000 mは供試プロットについて計算した。

表-18は，判別関数による判別結果から樹種別の的中率を計算し，その平均値を一覧にしたものである。高度500 mと1,000 mについては9樹種，高度2,000 mについては6樹種群の平均である。なお高度2,000 mについては，その他の撮影高度の写真とは判別の対象が異なり林分を扱っているので，その的中率は単木を対象とする高度500 mと1,000 mと同等には比較できないことに留意しなければならない。

高度500 mと1,000 mは同じ供試木を判別したものであるが，すべての波長帯域組み合わせで，撮影高度が高くなることによって樹種判別の的中率が低くなっている。

4バンド組み合わせと3バンド組み合わせの場合の的中率を比較すると，撮影高度500 m（縮尺1:5,000）では，B×G×IRの3バンド組み合わせの的中率が4バンド組み合わせのそれと変わらない。すなわち，低高度においてはRバンドの効果は他の3バンドに比べて非常に小さい。ところが，高度が高くなって1,000 m（縮尺1:10,000）になると，3バンド組み合わせは4バンド組み合わせよりも明らかに判別効果が低くなり，またB×G×IRの効果はG×R×IRのそれよりも若干小さい。さらに高度が高くなって2,000 m（縮尺1:20,000）になると，Bバンドは大気による散乱のためほとんど効果を失ってしまう。そのため長波長の3バンドを組み合わせたG×R×IRは，Bバンドを加えた4バンド組み合わせの効果とほとんど差がないようになる。それに比べてB×G×IRの効果は非常に小さい。

B×G×Rの波長帯域組み合わせの効果は，どの撮影高度においても3バンド組み合わせ

中で非常に小さい効果しか認められない。しかもIRバンドを含む2バンド組み合わせよりも劣っている。このことから，リアルカラー写真は樹種識別には有効でないことが知られる。一方，赤外カラーフィルムの波長帯域組み合わせであるG×R×IRは撮影高度の低い500mではB×G×IRに劣っているが，高度が高くなって1,000mになると相対的に効果が高くなり，さらに2,000mになるとその効果は非常に大きくなる。すなわち，赤外カラー写真はリアルカラー写真よりも効果が大きく，とくに高度の高い場合に効果的である。

表-18より2バンド組み合わせについてみると，撮影高度500mではB×IR，高度1,000mではG×IR，高度2,000mではR×IRの効果がそれぞれ高いことを知る。IRバンドは撮影高度に関係なく樹種識別に有効であるが，可視部の3バンドは，撮影高度が低い場合にはBバンドの効果が高く，高度が高くなるにつれて，GバンドからRバンドというように長波長バンドが有効になってくる。高度2,000mの場合のR×IRの2バンド組み合わせの効果は非常に大きくなり，4バンド組み合わせや3バンド組み合わせとの効果の差が縮まる。これは高度が高いため，Bバンドとともに，それに次いで波長の短いGバンドまでが散乱の影響を大きく受けて樹種識別の効果が減少したため，長波長のR×IRの組み合わせの効果が相対的に高くなったものとみてよい。

本研究で取り扱った最高撮影高度2,000mより高くなる場合を予測するならば，Bバンドは完全に効果を消失し，Gバンドも効果が非常に小さくなることが考えられる。したがって，この場合はR×IRの2バンド組み合わせの効果が他のものに比べて大いに期待されるところである。

カラーフィルムを含むマルチスペクトル写真のごとく，被写体の分光特性の相違を捉えて識別しようとする場合には，使用する波長帯域の選択が非常に重要となる。しかも，波長帯域数が多ければよいというような単純な考え方は誤っている。

従来，航空写真の利用は主として縮尺とかかわって論究されてきた[9),38),75),87),93)]。これは地形や被写体の形状とその大きさを判読することと密接に関連している。

本研究においては，撮影縮尺1:5,000と1:10,000の写真では成熟した単木の樹冠を識別することが可能であったが，1:20,000写真では測色計の顕微鏡で観察しても広葉樹の中の大きな樹冠を有するものしか識別できなかった。したがって，単木ごとの樹種を識別するためには1:10,000より大きな縮尺で撮影すべきであるが，樹種群については，1:20,000より小縮尺写真が適当であるといえる。しかし，撮影縮尺はフィルムやレンズの解像力と関連させて考える必要がある。解像力がきわめて高い写真であれば，理論的には撮影縮尺が被写体の形状の識別に大きな影響を与えるとは考えられない。同じ焦点距離のレンズによって撮影縮尺の小さな写真をえようと撮影高度を上げたため，光の散乱などの影響によってコントラストの減少がおこり，ひいては単木の樹冠の識別が困難になったと考えることができる。さらに，マルチスペクトル写真の場合には，被写体の分光特性を反映している写真色調の判読が重要となってくる。

したがって，撮影縮尺よりも撮影高度をより重要な要素として取り上げねばならないことをここで強調しておく。

IV. 樹種識別に有効なカラーフィルムの種類

カラーフィルムは被写体の分光反射特性の差を色彩の差として視覚的に訴えることができるところに大きな特長がある。したがって樹種識別に効果的なカラーフィルムの必要条件は，樹種の分光反射特性の差をできるだけ明瞭な色彩の差として表示できることである。筆者は，樹種識別に有効な波長帯域組み合わせを感光層とするカラーフィルムがこの条件を満足させることができると予測し，その波長帯域組み合わせを明らかにしてきた。ここではさらに，このような波長帯域組み合わせによってカラー写真を合成し，筆者の予測が正しいかどうかを検証する。

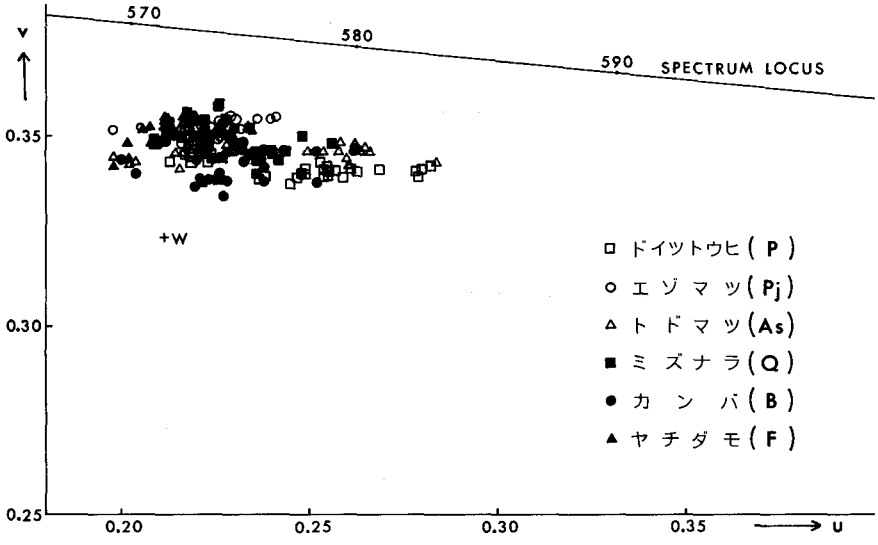
1. カラー写真の合成と供試木・供試プロットの測色

撮影高度 500 m と 2,000 m のマルチスペクトル写真を用い，いくつかの波長帯域組み合わせを選んでカラー画像を合成した。その波長帯域組み合わせは，III における検討で大きな効果を示したものから小さな効果しか示さなかったものまでを含むように配慮している。合成したカラー画像はカラーフィルムに記録し，これを測色することによってカラー写真の識別効果を比較検討した。

マルチスペクトルカメラは4台のカメラで構成されており，4個のレンズを使用しているが，それらのレンズの歪曲が完全に一致していることはまれである。したがって，マルチスペクトルビューワー上で，波長帯域別にえられた画像を互いに重ね合わして（これをレジストレーションという）カラー画像を合成するするさいに，そのレジストレーションずれ以外にカメラとビューワーの両方のレンズによる歪曲の違いが加わり，画面全体にわたって画像を完全に一致させて鮮明なマルチスペクトルカラー写真をえることは困難である。これらのカラー写真を測色する場合，撮影高度 500 m (縮尺 1:5,000) のように供試木の樹冠像が大きく，測定口径も大きい場合には僅かな画像のずれはあまり問題にならない。また撮影高度 2,000 m (縮尺 1:20,000) のように単木ではなく，樹種群として比較的大きな面積のプロットを対象とする場合にも，僅かな画像のずれは測色のさいにはそれほどの障害とはならない。ところが，撮影高度 1,000 m (縮尺 1:10,000) のように単木を対象にし，しかもその画像が小さく測定口径も小さい場合には，僅かな画像のずれも測色に影響を与えると考えられる。これらの問題を考慮した結果，カラー画像を合成し，測色によってその識別効果を検討するさいには，撮影高度 1,000 m の写真を除外するのが安全であると判断し，高度 500 m と 2,000 m の写真によってこれらの検討を行うことにした。

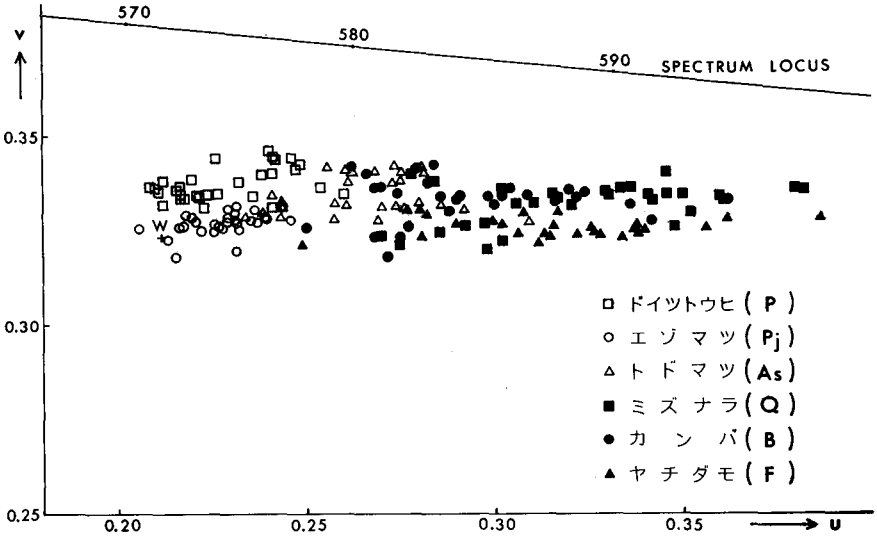
カラー画像の合成にあたっては，3波長帯域組み合わせの中から，リアルカラーとして B×G×R，赤外カラーとして G×R×IR，その他に撮影高度 500 m において最大の識別効果

を示したB×G×IRの3組を，また2波長帯域組み合わせの中から，それぞれ高度500 mと2,000 mで大きな効果を示したB×IRとR×IRの2組を選び，合わせて5組の波帯域組み合わせについてカラー画像の合成を行った。また，波長帯域と色光の組み合わせは，リアルカラー写真および赤外カラー写真と同じ条件とした。すなわちバンド組み合わせの中で最も長い



図—13　リアルカラー写真上の供試木の色度 (撮影高度500 m)

Fig. 13. Chromaticity coordinates of sample trees appearing in composed real color photographs (at flight altitude of 500 m).



図—14　赤外カラー写真上の供試木の色度 (撮影高度500 m)

Fig. 14. Chromaticity coordinates of sample trees appearing in composed infrared color photographs (at flight altitude of 500 m).

波長のバンドに赤の色光 (r), 中間の波長のバンドに緑の色光 (g), 最も短い波長のバンドに青の色光 (b) を組み合わせた。すなわち, マルチスペクトルビューワーを使用して B×G×R (b×g×r), G×R×IR (b×g×r), B×G×IR (b×g×r), B×IR (g×r), R×IR (g×r) の5種類のカラー画像を合成し, それをカラーフィルムに記録した。合成したカラー写真の一部を, 合成に使用した波長帯域別写真とともに写真-7および写真-8として示しておく。

合成した5種類のカラー写真について, 撮影高度500 m では9樹種にわたる供試木257本を, 撮影高度2,000 m では6樹種群にわたる供試プロット100点を測色した。測色した色度座標は, それぞれのカラー写真ごとに CIE 1960 UCS 色度図上に表示した。これらの色度図より, 同じ樹種の供試木あるいは同じ樹種群の供試プロットはある範囲に集まる傾向がみられるが, 異なる樹種, 樹種群と重複する範囲も大きいことが認められる。しかしカラー写真の種類によって, 供試木, 供試プロットの分布する範囲が大きく異なっている。この例として, リアルカラー写真上の供試木の色度と赤外カラー写真上の供試木の色度をそれぞれ色度図上に表示したものが図-13と図-14に示されている。両図を比較すると, III で推定したように, 赤外カラー写真に比べてリアルカラー写真は樹種識別に有効でないことを知る。ただし, 色度図ではカラー画像のもつ明るさ (濃度) が除外されていることに留意しなければならない。

2. カラー写真間の樹種識別効果の比較

合成した5種類のマルチスペクトルカラー写真を測色した結果から, 撮影高度500 m については9樹種を, 高度2,000 m については6樹種群を判別するための判別関数をカラー写真の種類ごとに構成した。その場合, 色度座標 u, v の2変数を説明変数として構成したものと, それらに濃度を加えて3変数を説明変数として構成したものの2種類の判別関数を求めた。この理由は, 色彩が色度座標 u, v と明るさの3次元の立体座標として定義されるが, しばしば明るさのパラメーター (濃度) を除外して色度図上に表示されることを考慮したからである。これまでにカラー写真上の樹木の色度座標を測定し, 色度図上に表示することによって樹種の判別が可能であるという報告がなされている[11),92)]。そこで色度座標のみによる判別効果と, 色度座標に濃度を加えた場合の判別効果を比較検討するため, 2種類の判別関数を求めた。

撮影高度500 m の場合の1例として, 表-19に G×R×IR (b×g×r) 合成赤外カラー写真上の濃度と色度座標 u, v から構成した判別関数を用いて供試木の樹種を判別した結果を示す。表-20には撮影高度2,000 m の場合の例として, 合成赤外カラー写真について濃度と色度座標 u, v から供試プロットの樹種群を判別した結果を示した。

このようにして5種類のカラー写真について, 撮影高度500 m の場合には供試木の樹種を, 撮影高度2,000 m の場合には供試プロットの樹種群を判別し, その平均判別的中率を求めた。この平均判別的中率を, 表-18に示した波長帯域別写真濃度から樹種を判別した場合の平均判別的中率と対照したのが表-21である。同様にして, 撮影高度2,000 m について6樹種群にわたる供試プロットを判別した場合の平均判別的中率を一覧したのが表-22である。表-21

および表-22はいずれもIIIにおいて検討した波長帯域別写真濃度による判別効果の大きい波長帯域組み合わせの順に配列したものである。

この両表をみると，波長帯域別写真における判別的中率が，それと同一の波長帯域から合成したカラー写真における判別的中率よりも高いことがわかる。ただ1つの例外として，撮影高度500 mの場合のG×R×IRの波長帯域組み合わせがある。この組み合わせでは波長帯域別写真濃度による平均判別的中率が64.9%であるのに対し，合成カラー写真上の濃度と色度座

表—19　濃度と色度座標 u, v による供試木の判別結果の例 (G×R×IR (b×g×r) 合成赤外カラー写真，撮影高度500 m)

Table 19. Example of discrimination results of sample trees when the variables used in computing discriminant functions are the photographic density and the chromaticity coordinates u and v (G×R×IR (b×g×r) composed infrared color photographs, at flight altitude of 500 m)

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U		
P	21	0	3	6	0	0	0	0	0	30	70.0
Pj	1	29	0	0	0	0	0	0	0	30	96.7
As	2	0	21	1	0	5	0	0	1	30	70.0
L	2	0	0	18	0	0	1	0	0	21	85.7
Q	0	0	0	0	16	0	10	2	2	30	53.3
B	1	1	8	0	0	14	0	2	4	30	46.7
A	0	0	0	0	5	1	21	1	2	30	70.0
F	0	1	0	0	1	1	2	17	4	26	65.4
U	0	0	1	0	4	6	3	7	9	30	30.0

表—20　濃度と色度座標 u, v による供試プロットの判別結果の例 (G×R×IR (b×g×r) 合成赤外カラー写真，撮影高度2,000 m)

Table 20. Example of discrimination results of sample plots when the variables used in computing discriminant functions are the photographic density and the chromaticity coordinates u and v (G×R×IR (b×g×r) composed infrared color photographs, at flight altitude of 2,000 m)

真の樹種群 Tree species group	判別による樹種群 Number of sample plots classified into						計 Total	判別的中率 Accuracy (%)
	PF	AF	LF	BF	BL	SS		
PF	9	3	3	0	0	0	15	60.0
AF	2	13	0	0	0	0	15	86.7
LF	0	0	15	0	0	0	15	100.0
BF	0	1	0	8	1	0	10	80.0
BL	4	1	3	2	17	3	30	56.7
SS	0	0	0	0	0	15	15	100.0

標 u, v によるそれは65.3% であり，後者がわずか0.4% 高くなっている。しかしこれは誤差の範囲と考えてよい。

さらに合成カラー写真において濃度と色度座標 u, v による判別と，色度座標 u, v のみによる判別の効果を比較すると，高度 500 m における R×IR (g×r) を除けば撮影高度 500 m と 2,000 m のすべての合成カラー写真で前者の判別的中率が高くなっている。したがって色度座標 u, v だけから判別するよりも濃度を付加して判別することが有効であり，判別的中率で10% 以上の差におよぶ場合がしばしばみられる。

表—21 マルチスペクトル写真と合成カラー写真の樹種判別的中率の比較 (撮影高度 500 m)

Table 21. Comparison of classification accuracy between multispectral photograph and composed color photograph (at flight altitude of 500 m)

マルチスペクトル写真 Multispectral photograph		合成カラー写真 Composed color photograph		
波長帯域組み合わせ Spectral band combination	写真濃度による平均判別的中率 Classification accuracy by photo density (%)	波長帯域—色光組み合わせ Spectral band-color light combination	濃度と色度座標 u, v による平均判別的中率 Classification accuracy by photo density and chromaticity coordinates u and v (%)	色度座標 u, v による平均判別的中率 Classification accuracy by chromaticity coordinates u and v (%)
B×G×IR	70.9	B×G×IR (b×g×r)	64.6	54.4
G×R×IR	64.9	G×R×IR (b×g×r)	65.3	53.7
B×IR	60.9	B×IR (g×r)	57.8	56.2
R×IR	55.3	R×IR (g×r)	51.8	51.9
B×G×R	49.8	B×G×R (b×g×r)	47.1	35.2

表—22 マルチスペクトル写真と合成カラー写真の樹種群判別的中率の比較 (撮影高度 2,000 m)

Table 22. Comparison of classification accuracy between multispectral photograph and composed color photograph (at flight altitnde of 2,000 m)

マルチスペクトル写真 Multispectral photograph		合成カラー写真 Composed color photograph		
波長帯域組み合わせ Spectral band combination	写真濃度による平均判別的中率 Classification accuracy by photo density (%)	波長帯域—色光組み合わせ Spectral band-color light combination	濃度と色度座標 u, v による平均判別的中率 Classification accuracy by photo density and chromaticity coordinates u and v (%)	色度座標 u, v による平均判別的中率 Classification accuracy by chromaticity coordinates u and v (%)
G×R×IR	88.3	G×R×IR (b×g×r)	80.6	55.0
R×IR	81.1	R×IR (g×r)	75.6	69.4
B×G×R	76.1	B×G×R (b×g×r)	69.4	66.1
B×G×IR	67.2	B×G×IR (b×g×r)	66.1	57.2
B×IR	66.1	B×IR (g×r)	51.1	40.6

カラー写真を合成した目的は，樹種識別に効果的なカラーフィルムの種類を判定することである。筆者は，III で判定した樹種識別に効果的な波長帯域に感光する乳剤層をもつカラーフィルムが樹種識別に有効であると予測した。この予測を検証するため，前述の5組の波長帯域組み合わせによって，波長帯域別写真における判別効果の順序関係と合成カラー写真における判別効果の順序関係を比較してみた。

まず表-22によって，波長帯域別写真における判別的中率の大きさの順序と合成カラー写真におけるそれとを比較すると，合成カラー写真上の画像のもつ明るさを考慮せず，色度座標 u, v のみで判別した場合の順序は波長帯域別写真の順序とは異なっている。しかし合成カラー写真上の濃度と色度座標 u, v による判別では，その的中率の大きさの順序は波長帯域別写真の場合と全く同じである。

一方表-21において，合成カラー写真上の濃度および色度座標 u, v による判別的中率の大きさの順序と，波長帯域別写真のそれとを比較すると，B×G×IR と G×R×IR の順序が入れ替わっているだけで，その他の波長帯域組み合わせの判別効果の順序は同じである。波長帯域別写真では，B×G×IR 組み合わせの平均判別的中率は 70.9%，G×R×IR 組み合わせのそれは 64.9% であり，前者が 6% 高くなっている。ところが，それらの波長帯域組み合わせによってカラー画像を合成した場合，前者の的中率が逆に後者のそれよりもわずか 0.7% 小さくなったわけである。この原因としては，B バンドのフィルムの特性曲線の勾配 (γ) が G バンドのフィルムに比べて小さいため，B バンド写真濃度のもつ情報が G バンドに比べて十分には色彩に反映されなかったことが考えられる。というのは，フィルムの γ は波長によって変化することが知られ，一般に短波長光の露光に対する γ は長波長光の露光に比較し低くなるからである[90]。波長帯域別写真濃度による判別の場合であれば，表-7のように γ の低い B バンドに対する判別関数の係数が大きいことによって γ の低さは補われうるが，カラー画像の合成においてはそのようなわけにはいかない。ただポジフィルムの現像時に B バンドフィルムの γ を高くし，それをカラー画像の合成に使用すれば B×G×IR (b×g×r) のほうが G×R×IR (b×g×r) よりも判別的中率が高くなることも考えられる。さらに合成カラー写真における両者の判別的中率の差が 0.7% と非常に小さいことを考慮すれば，波長帯域別写真と合成カラー写真における波長帯域組み合わせの効果の大きさの順序関係は一致するといってよい。

表-9 と 表-19，あるいは 表-15 と 表-20 を比較すると，同じ波長帯域組み合わせであっても，波長帯域別写真の場合とカラー写真の場合とでは，各樹種に対する的中率の大きさの順序に差がみられる。これは，たとえば，カンバの判別に G×R×IR が有効であるからといって，必ずしもその組み合わせでカラー写真を合成すればカンバの判別に有効とは限らないことを意味している。しかし，9樹種あるいは6樹種群を総合した判別効果を考えるならば，前述のように，波長帯域別写真とカラー写真における波長帯域組み合わせの効果は一致するのである。

以上のことから，III において樹種識別に効果的であることを明らかにした波長帯域組み

合わせを感光層とするカラーフィルムが，樹種識別に最適であることを知る。しかし，カラー写真の効果は波長帯域別写真によって判別する場合よりも一般的に多少低下することがうかがわれる。しかし波長帯域別写真では2枚あるいは3枚の写真を用いるという煩雑さと肉眼判読の困難なことを考え合わせれば，カラー写真は現場と密着した写真利用という点でこのマイナス効果を補って余りあるものである。

また，カラー写真上で明るさを考慮せず色度のみを測定し，それを色度図上に表示することによって樹種判別を行う方法よりも，より完全に色彩を表わすことができるように，色度座標に明るさのパラメーターとしての濃度を付加して3次元座標として樹種の判別を行うべきである。

V. 色調以外の要素を加えた写真判読の樹種識別の効果

III-3では波長帯域別白黒写真を用いてその写真濃度から，IV-2では合成カラー写真を用いてその色彩から，すなわち色調だけによって供試木の樹種識別を行った。しかし，一般的に行われる樹種識別は，そのための「鍵」として色調のみならず樹冠形，きめ，位置などの諸要素を使用している。マルチスペクトル写真による識別の場合にも，色調以外の要素を考慮することによって当然識別精度が向上するはずである。本章においては，この色調以外に樹冠形と樹木の生育位置の2要素を判読の「鍵」に導入し，それによって樹種識別の精度がどのように向上するかの検討を撮影高度500 m (縮尺1:5,000) 写真で試みた。

樹冠形や位置などの多くの判読要素は，写真濃度や色彩のように機械によって測定し客観化することが困難である。そのため従来の写真判読は判読者の知識や熟練度に依存する面が強く，個人的あるいは技能的であるといわれてきた。そこで本章では樹冠形と生育位置の判読を全く熟練を必要としないように，樹冠形は広葉樹と針葉樹，樹木の生育位置は沢沿いであるか否かのそれぞれの区分にとどめた。

1. マルチスペクトル写真における色調と樹冠形，生育位置による識別

マルチスペクトル写真濃度はB, G, R, IRバンドのすべてを用い，これれらの写真濃度に樹冠形，生育位置を判読要素に加えて樹種識別を行った。樹冠形と生育位置の判読はRバンド写真を立体視して行ったが，それはこの写真が樹冠形を比較的鮮明に表わしていることによる。

樹種を識別する手順は次のとおりである。

① 識別対象木の写真濃度から，III-3の表-7に示した判別関数によって樹種を判別する。

② 対象木の樹冠形が針葉樹と広葉樹のどちらであるかを判読する。

③ 前述の①で判別した樹種が②で判読した結果とくい違う場合には，その対象木の樹種は識別不可能として扱う。

④ さらに対象木の生育位置が沢沿いかどうかを判読する。

⑤ さきの①で判別した結果がミズナラかカンバで，対象木の位置が沢沿いである場合に

は，両樹種はそのような湿地に生育することはまれであるのでその樹木を識別不可能とする。判別した結果がヤチダモであり，その樹木の位置が沢沿いでない場合には，ヤチダモが湿地以外に生育していることに疑問があるとして，その樹木を識別不可能として扱う。

上記の手順は，写真濃度によって判別した結果を樹冠形と生育位置の判読によってチェックすることにある。それに抵触するものは誤って判別している可能性が高いので識別不可能として扱い，このチェックを通過したものだけが最終的な樹種識別を完了することになる。識別不可能とした樹木の中には，樹冠形の特徴から樹種を判定できるものもあるが，そのようなものについても識別は行わなかった。それは判読者の経験が乏しいことを仮定し，樹冠形は針葉樹と広葉樹の区分しかできないものとしたからである。熟練した判読者ならば，典型的な樹冠形を有する樹木については針葉樹中のトドマツ，エゾマツ，カラマツの識別を行いうるし，さらに広葉樹中でもヤチダモやカンバのような特徴的な樹種については識別できることも多い。また生育位置や群落などの生態的知識なども考慮することによってさらに識別できる樹種は増加するであろう。したがって，これらの肉眼判読によって明らかに樹種識別をなしうるものについては，識別不可能とする必要はない。そして肉眼判読によっては具体的に樹種を断定することは危険であるが，写真濃度に基づく自動判別の結果が明らかに誤まりであると判断できる樹木についてのみ識別不可能とするならば，識別不可能な樹木数も少なく，また識別の精度も高くなるはずである。全樹木の識別を行って間違ったものがふえることに比べ，多少の識別不可能を許すことにより識別結果の信頼性を高めることは大きな意義をもつ。

写真濃度から樹種を自動判別する場合，まず少数の標本をとって現地調査を行い，そのデータから判別関数を推測する。その次の段階として，推測された判別関数を未知の標本に適用して樹種を判別するのであるが，ここでは判別関数の推測に用いた供試木257本について判別を行った。そしてその判別結果が樹冠形と生育位置によるチェックを経て，識別された樹種となるのである。このようにして257本の供試木の全体について樹種を識別すると表-24のごとくなる。

識別結果の正確度を知るための指標としての識別の的中率の表現には，次の2つの場合が考えられる。

① 現地における特定樹種の標本数に対してその標本中正しく識別された数の比をとる場合。例えば，トドマツについて識別したときにトドマツとして識別できた本数あるいはプロットの比率を的中率とする。

② 特定の樹種に識別した標本数に対する真の樹種（現地における樹種）との合致数の比をとる場合。例えば，トドマツとして識別した本数のなかで実際にトドマツであった本数の比率を的中率とする。

本論文では両者を区別するため，①の場合を判別的中率，②の場合を判読的中率と称した。

表-23は表-8から判読的中率を求めたものである。この表における9樹種の判読的中率の平均は70.1%であり，これは判別的中率平均の70.5%と差がない。一方，樹冠形と生育位置によって自動判別をチェックした場合の表-24における9樹種の平均判読的中率は77.2%で

表—23 写真濃度のみを判読要素としたときの識別結果

Table 23. Results of identification using only photo density as interpretation key

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U	
P	23	0	4	3	0	0	0	0	0	30
Pj	0	27	1	2	0	0	0	0	0	30
As	2	1	17	1	0	8	1	0	0	30
L	2	0	0	19	0	0	0	0	0	21
Q	0	0	0	0	20	0	8	2	0	30
B	0	0	7	0	0	22	0	0	1	30
A	0	0	0	0	8	0	19	1	2	30
F	0	0	0	0	1	0	1	20	4	26
U	0	0	2	0	3	3	3	7	12	30
計 Total	27	28	31	25	32	33	32	30	19	257
判読的中率 Accuracy (%)	85.2	96.4	54.8	76.0	62.5	66.7	59.4	66.7	63.2	

表—24 写真濃度および樹冠形，生育位置を判読要素としたときの識別結果

Table 24. Results of identification using photo density, crown shape and location as interpretation keys

真の樹種 Tree species	判読による樹種 Number of sample trees identified into									識別不可能 Not identified		計 Total
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U	樹冠形によって By crown shape	生育位置によって By location	
P	23	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	30
Pj	0	27	1	2	0	0	0	0	0	0	0	30
As	2	1	17	1	0	0	0	0	0	9	0	30
L	2	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	21
Q	0	0	0	0	20	0	8	2	0	0	0	30
B	0	0	0	0	0	20	0	0	1	7	2	30
A	0	0	0	0	8	0	19	0	2	0	1	30
F	0	0	0	0	0	0	1	20	4	0	1	26
U	0	0	0	0	2	0	3	7	12	2	4	30
計 Total	27	28	22	25	30	20	31	29	19	18	8	257
判読的中率 Accuracy (%)	85.2	96.4	77.3	76.0	66.7	100.0	61.3	69.0	63.2			

あり，写真濃度だけを判読の「鍵」とした場合よりも7%以上高くなっている。そして樹冠形によって識別不可能としたものは18本，生育位置によって識別不可能としたものは8本，合計26本であり，全識別対象本数257本の10.1%にあたる。生育位置によって識別不可能として扱ったカンバ(B)の2本は，濃度による判別では的中していたが，沢沿いに位置していたために誤った判別の可能性が高いとして識別不可能とされたものである。

これらの結果から，写真判読の経験が全くなくてもできるようなごく簡単な要素をとり入れて，濃度による樹種判別結果をチェックすることにより，誤った判別の可能性の高いものを除外し識別の精度をかなり向上させうることが認められた。写真判読にある程度熟練すれば，典型的な樹冠形を有するものについては樹種を識別できるようになり，また生育位置についても沢沿いといった区分ではなく，湿地や乾燥地を地形や植生に関連させて識別できるようになるのである。したがって樹種識別不可能とする数も少なく，かつ判読的中率もさらに向上するはずである。

また樹冠形によって針葉樹，広葉樹を区別することは容易である。そこでまず両者の区別を樹冠形によって行ったのち，針葉樹，広葉樹別々に判別関数を構成し，樹種判別を行った。すると，9樹種の平均判読的中率は74.8%となり，色調だけの場合よりも4.7%向上した。この判別結果を生育位置によってチェックするならば，さらに的中率の向上が期待できる。この検討を植栽木である針葉樹を除き，天然分布をしている広葉樹5樹種にわたる供試木146本について行ってみた。この結果，広葉樹5樹種の平均判読的中率を求めると70.9%であった。生育位置によってチェックする前の広葉樹5樹種の平均判読的中率は68.0%であったので，生育位置を判読の「鍵」として導入したことによって的中率が2.9%向上したことになる。このとき識別不可能な木として扱った本数は9本であった。

2. カラー写真における色調と樹冠形，生育位置による識別

IV-2ではカラー写真から色彩だけを判読要素として供試木の樹種を判別した。ここでは色彩以外の要素をも考慮して樹種識別を行うと，その精度をどの程度向上させうるかを検討する。色彩以外の要素としては樹冠形と樹木の生育位置をとりあげ，その判読は写真判読の経験がない者でも可能な程度とし，V-1と同様の手順で色彩による機械的判別の結果をチェックした。使用したカラー画像は撮影高度500 m (縮尺1:5,000) の B×G×IR (b×g×r) 合成写真である。

表-25はIV-2において濃度と色度座標 u, v から樹種を判別した結果から判読的中率を求めたものである。この9樹種についての平均判読的中率は64.1%である。表-26は，樹冠形と樹木の生育位置を判読することにより，色彩による自動判別の結果をチェックし，誤判別の可能性の高いものを識別不可能とした場合の結果を示している。これをみると9樹種の平均判読的中率は75.8%となり，色彩だけを判読要素とした場合よりも11.7%も向上している。識別不可能は合計35本であり，全供試木中の13.6%にあたる。

表-23 と 表-25 を比較すると，この前者の平均判読的中率は 70.1%，後者のそれは 64.1% であり，合成カラー写真上の色彩による樹種判別は 4 バンドの写真濃度によるそれより 6.0% 劣っている。またカラー画像合成に使用した B, G, IR バンドの写真濃度によって判別した場

表—25 色彩のみを判読要素としたときの識別結果

Table 25. Results of identification using only color as interpretation key

真の樹種 Tree species	判別による樹種 Number of sample trees classified into									計 Total
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U	
P	23	0	3	4	0	0	0	0	0	30
Pj	0	28	0	2	0	0	0	0	0	30
As	2	2	16	1	0	6	0	0	3	30
L	2	0	0	19	0	0	0	0	0	21
Q	0	0	0	0	11	0	12	5	2	30
B	0	0	9	2	0	15	0	1	3	30
A	0	0	0	0	3	0	20	3	4	30
F	0	0	1	0	4	0	1	15	5	26
U	0	0	2	0	4	1	3	3	17	30
計 Total	27	30	31	28	22	22	36	27	34	257
判読的中率 Accuracy (%)	85.2	93.3	51.6	67.9	50.0	68.2	55.6	55.6	50.0	

表—26 色彩および樹冠形，生育位置を判読要素としたときの識別結果

Table 26. Results of identifiction using color, crown shape and location as interpretation keys

真の樹種 Tree species	判読による樹種 Number of sample trees identified into									識別不可能 Not identified		計 Total
	P	Pj	As	L	Q	B	A	F	U	樹冠形によって By crown shape	生育位置によって By location	
P	23	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	30
Pj	0	28	0	2	0	0	0	0	0	0	0	30
As	2	2	16	1	0	0	0	0	0	9	0	30
L	2	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	21
Q	0	0	0	0	11	0	12	2	2	0	3	30
B	0	0	0	0	0	15	0	0	3	11	1	30
A	0	0	0	0	3	0	20	1	4	0	2	30
F	0	0	0	0	0	0	1	15	5	1	4	26
U	0	0	0	0	3	0	3	3	17	2	2	30
計 Total	27	30	19	26	17	15	36	21	31	23	12	257
判読的中率 Accuracy (%)	85.2	93.3	84.2	73.1	64.7	100.0	55.6	71.4	54.8			

合の平均判読的中率は70.3%だったので，これよりも合成カラー写真上の色彩による判別は6.2%劣る。一方，樹冠形と生育位置を考慮した場合の平均判読的中率は表-24にみられるごとく，波長帯域別写真では77.2%であり，合成カラー写真の場合はこれよりも1.4%劣っている。さらに識別不可能木の数は合成カラー写真では波長帯域別写真よりも9本，比率にして3.5%増加している。すなわち，写真濃度あるいは色彩以外に樹冠形と生育位置を考慮することにより，波長帯域別写真と合成カラー画像の間の識別効果の差が小さくなることがうかがわれる。その代わりに，識別不可能木の数は前者よりも後者で若干増加する傾向がみられる。

また樹冠形によって針葉樹・広葉樹の区別を行ったのち，針葉樹・広葉樹別に判別関数を構成した場合には，9樹種の平均判読的中率は71.3%となり，色彩だけで判別した場合よりも7.2%向上した。広葉樹5樹種について生育位置によってチェックを行ってみると，チェックを行う前よりも5樹種の平均判読的中率は5.9%向上した。識別不可能な樹木は供試木146本中14本であった。

以上の結果より，写真判読の経験のない者でも判読しうる簡単な要素を判読の「鍵」として導入し，色彩による自動判別結果をチェックするだけでも誤った識別の確率を減らすことができ，識別精度をかなり向上させうることを認めた。写真判読に熟練するにしたがって，より精密な判読の「鍵」を利用することができ，一層識別の精度を向上させうるのである。

VI. 結　　論

大面積にわたる森林は地上調査だけでその状況を捉えることは困難であり，戦後一貫して森林調査において近代統計学と結合した航空写真の活用が図られてきたのも，当然のことである。そして経済の発展に伴って木材生産あるいは国土保全のうえで，奥地天然林はますます重要な位置を占めてきている。このような天然林の施業を行うにあたっては，まず森林の構造を十分把握し，それに応じた適切な取り扱いが望まれる。この森林の構造を把握する重要な手段としては林分の分類があり，これは航空写真を利用してこそ効果的に行いうるものである。そのさいに樹種構成は，木材利用上さらに造林学的取り扱いの上で重要な意義を有し，林分の分類のさいに主要な標識となる。

樹種を航空写真上で識別するための研究は，これまでにも数多くなされている。しかし樹種識別に最も適したカラーフィルムの種類については，新しいカラーフィルムがつぎつぎに開発されていることもあって，今だに十分には明らかにされていない。そこでこの研究では樹種識別に有効なカラーフィルムの種類について検討した。

まずカラーフィルムも含めて，マルチスペクトル写真のように被写体の反射光を複数の波長帯域に分離し記録する手段が，樹種識別に有効であるかどうかを検討してみた。波長帯域別の写真濃度によって分散分析を行ったところ，樹種間，波長帯域間に0.1%水準で有意差がみ

られ，その可能性が確認された。

樹種識別に有効な波長帯域組み合わせを明らかにすることができれば，それを感光層とするカラーフィルムが樹種識別に効果的であると考えて研究をすすめた。結論としていえば，樹種識別に有効な波長帯域は撮影高度によって変化することが認められた。IR バンドはすべての高度で非常に有効であった。低高度 (500 m, 縮尺 1:5,000) では IR バンド以外に B および G バンドが有効であり，B, G, IR の 3 波長帯域の写真濃度から 9 樹種を判別した結果，平均 70.9% の判別的中率をえた。これら3バンドに R バンドを加えても判別的中率は向上せず，低高度においては R バンドの効果の小さいことが知られた。高度が上昇し 1,000 m (縮尺 1:10,000) になると B バンドの効果は相対的に低下し，R バンドと大差がなくなる。さらに高度が 2,000 m (縮尺 1:20,000) に上昇すると，短波長の B バンドの樹種識別への効果は非常に小さくなり，B バンドを加えた 4 バンドと，それを除いた 3 バンドによる樹種判別の効果には差が認められない。さらに G バンドの効果も小さくなり，R と IR の 2 バンドの組み合わせでかなりの判別的中率をえた。

各種の波長帯域組み合わせの判別効果を比較することにより，多数の波長帯域を使用することが必ずしも判別効果を向上させることにはならないことが知られ，効率的な樹種識別を可能にする方向が明らかにされた。

各種のカラーフィルムによって撮影してえられるカラー写真と同様のカラー画像を合成し，カラーフィルムの識別効果を比較した。これによって樹種判別に効果の大きい波長帯域組み合わせほど，合成したカラー画像でも識別効果の大きいことが認められた。リアルカラー写真は撮影季節が夏の場合には樹種識別に有効でなく，一般的に赤外カラー写真が優れていた。撮影高度が低い場合には B, G, IR の 3 バンドを感光層とするフォールスカラー写真が，撮影高度の高い場合には R と IR の 2 バンドを感光層とするフォールスカラー写真が有効であった。カラー写真上の色を色度図上に表示することにより樹種の判別を行う方法は，明るさのパラメータとして濃度を付加し，色を 3 次元座標として表示して判別する方法に比べて判別効果が小さく，的中率にしてその差は 10% 以上におよぶ場合が多かった。

波長帯域別の写真濃度あるいはカラー写真上の色を測定し，コンピューターによって樹種を自動判読した結果を生態的データの導入や肉眼判読によってチェックすることにより，識別精度が向上することが明らかになった。写真判読の経験のない者でも判読しうる簡単な樹冠形，生育位置を導入しただけで，識別した樹種の的中率は 7% あるいは 11% 以上向上した。

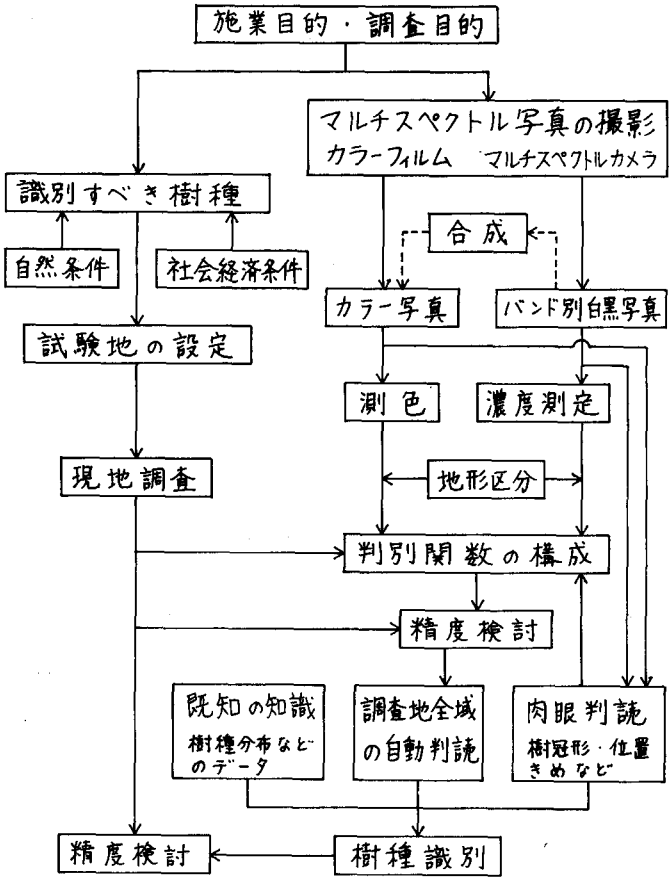
自動判読と肉眼判読を統一することにより，航空写真による樹種識別の精度を大きく向上させ，さらに，従来の樹種識別がもっていた技能的性格を是正し，より普遍性のあるものにすることが可能である。そのために，今後解決しなければならない課題として次のようなものが残されている。

第 1 に写真濃度あるいは色彩に混入するノイズの除去である。とくに，斜面方位や傾斜度

など地形によるノイズは，広い地域にわたって識別を行う場合に最も大きな障害となる。わが国の天然林のような地形の複雑な地域に応用する際には，そのノイズがほぼ一定となるような地形区分を行うことが必要である。そしてこの区分はできるだけ簡単なものにすべきである。これらのノイズを除去し，フィルム上の画像の濃度あるいは色彩を標準化することは，樹種の自動判読の精度を高め，肉眼判読の労力とその技能的性格を克服するうえで重要な課題となる。

第2に，樹種を自動判読した結果をチェックするための肉眼判読の「鍵」を作成することである。本研究では樹冠形と生育位置を判読の「鍵」の構成要素としたが，その判読は経験のない者でも容易になしうるものである。これらをもっと精密なものとし，さらに，きめ，群落状態など他の要素を導入することにより一層樹種の識別精度を高めることが可能である。しかも従来のような技能的性格の濃厚なものではなく，自動判読と肉眼判読を統一することによりそれほどの熟練を必要としない判読の「鍵」を作成できる。

以上のような課題が究明されることにより，マルチスペクトル写真は天然林の樹種識別の



図—15　マルチスペクトル写真による樹種識別の手順

Fig. 15. Flow of tree species identification by multispectral photographs.

有効な手段となしうるのである。その場合の樹種識別の手順は図-15のように模式化しうることを提案したい。

まず調査地域のマルチスペクトル写真の撮影にあたっては，カラーフィルムを使用する方式とマルチスペクトルカメラを使用して波長帯域別の画像を記録する方式の2種類が考えられる。さらにこの後者では，波長帯域別の画像を合成してカラー写真として利用する場合と，バンド別写真のままで利用する場合がある。

カラー写真については測色計によってカラー画像を測色し，濃度と色度座標の3次元データを収集する。バンド別写真についてはバンドごとに濃度を測定し，それらのデータを整理，統合しなければならない。その場合，波長帯域ごとに画像の濃度を測定するには多くの労力を必要とするのに対し，合成カラー画像であれば複数の波長帯域別画像が組み合わされて1つの画像になっているので，測定の労力は少なくてすむ。その点合成カラー画像が有利であるが，画像の解像力は波長帯域別写真より劣り，肉眼判読には不利となる。測定やデータの整理統合の煩わしさを除去し，また自動判読と肉眼判読を統一し，そのうえ現場と密着した写真利用を図るという視点に立つならば，識別効果の高い波長帯域組み合わせを感光乳剤層にもつカラーフィルムの利用が好都合である。そして一般的には赤外カラーフィルムが有用であることを本研究で明らかにした。また撮影高度とかかわっていえば，低高度ではB×G×IR，高高度ではR×IRというバンド組み合わせを感光乳剤層にもつフォールスカラーフィルムの開発が期待される。

調査設計にあたっては，まず施業目的と調査目的を定め，これに調査地の自然条件や社会経済条件を考慮して識別すべき樹種あるいは樹種群を決定する。そしてそれらを標本として選べるような試験地を設定し，現地調査によって測色データと現地標本の樹種を照合しなければならない。その後に試験地の標本によって判別関数が決定される。その場合，測定データに混入した地形によるノイズを地形区分にもとづいて除去し，データを標準化するか，あるいは地形区分ごとに判別関数を構成する必要がある。

ついでこの判別関数を試験地に適用してその精度を検討し，所定の精度で判別できない場合はその原因を究明し，これを除去したのち再度判別関数を構成する。所定の精度で判別できれば，その判別関数によって調査地全域に対して自動判読を実施する。それとともにカラー写真あるいは適当な波長帯域の白黒写真を肉眼で判読し，自動判読結果をチェックする。その場合，樹冠形，生育位置，きめ，群落状況などを判読要素とし，その肉眼判読の結果が自動判読の結果と矛盾する場合には識別を保留する。しかし，両者の判読結果が矛盾する場合でも，肉眼判読によって樹種が判定できる場合には識別を行うべきである。

また，判別関数を構成する前に，肉眼判読によって針葉樹と広葉樹というように大まかに樹種を分類しておく方法も有効である。大まかな分類ののちに，それぞれの分類ごとに判別関数を構成して樹種を判別し，再度肉眼判読を行って判別結果をチェックするのである。

以上のようにして自動判読と肉眼判読を結合し，樹種が最終的に識別される。この識別精度を検討するためには，試験地の標本を再度利用する。

濃度や色彩の測定には測定機を，判別関数の構成にはコンピューターを必要とするが，これらを使わずに簡便に識別を行うことも考えられる。すなわち樹種識別に効果の大きいフォールスカラーフィルムによって撮影し，試験地を設けて樹種ごとの色彩をおさえる。本研究においてカラー写真の色彩だけで自動判別を行った結果60％以上の判別的中率を示したことから，樹種ごとにある範囲の色彩にグループ化しうるとみてよい。その色彩の範囲を色票などと比色することにより，これを未知の地域に適用していく方法は，測色によって自動判別を行う場合よりも精度は劣るが，さらに色彩以外の肉眼判読要素をこれに加えることによって十分樹種の識別を行いうる。この方法は簡便なものであり今後の応用が期待できる。

要　　約

1) 樹種を識別するさいに，有効な航空写真の条件を明らかにすることが本研究の目的である。写真条件のうちでも最も重要なものとして，フィルムの種類と撮影高度をとりあげた。

2) カラーフィルムの種類は，乳剤層が感光する波長帯域の組み合わせによってきまる。したがって，樹種識別に有効な波長帯域組み合わせを明らかにすることができれば，それを感光層とするカラーフィルムの効果が高いと予測し，この予測が正しかったことを実証した。

3) 樹種識別に有効な波長帯域を検討するため，B (400～500 nm)，G (500～600 nm)，R (600～700 nm)，IR (700～900 nm) の4つの波長帯域に分割して捉えることのできるマルチスペクトルカメラによって試験地の撮影を行った。そのさい撮影高度は，樹種識別の効果の違いを検討するため，高度500 m (縮尺 1 : 5,000)，1,000 m (縮尺 1 : 10,000)，2,000 m (縮尺 1 : 20,000) の3段階とした。撮影時期は樹葉のスペクトル反射特性が安定している夏期とし，7月を選んだ。

4) 試験地としては札幌市西岡の月寒川上流地域を選んだ。この試験地は地形による写真濃度への影響を小さくするため，地形変化の小さい左岸地域を選んだ。

樹種の識別については単木の場合と林分の場合が考えられる。この前者については，試験地内より9樹種にわたり合計257本の供試木を選び，撮影高度500 m と 1,000 m の両写真によって検討をくわえた。後者の樹種群については，6樹種群にわたり合計100箇所の供試プロットを選び，撮影高度2,000 m の写真によって検討した。

5) 航空写真上で樹種を識別する際には，樹種の形態的特徴，生態的特徴，分光反射特性が利用される。このうち前2者は，波長帯域やフィルムの種類が異なっても変化しないので，樹種識別に有効な波長帯域やフィルムの種類を比較検討する際には除外して考えることができる。したがって本研究では，写真のもつ識別効果を客観的定量的に比較するのに，分光反射特性を用いている。

6) マルチスペクトル写真において，樹種の分光反射特性は波長帯域別写真上の濃度として記録される。そこでこのような記録方法が樹種識別の可能性をもつかどうかをみるため，写真濃度によって分散分析を行ったところ，樹種間，波長帯域間に0.1%水準で有意差がみられ，その可能性が確認された。

7) 各種の波長帯域組み合わせにより，測定した写真濃度から判別関数によって数理統計的に供試木，供試プロットの樹種を判別した。そしてその判別的中率によって，樹種識別に効果的な波長帯域組み合わせを判定した。

8) 上記の試験に基づき，多数の波長帯域を使用することが必ずしも判別効果を向上させることにはならないことが知られ，効率的な樹種識別を可能にする方向が明らかになった。

9) 撮影高度によって，樹種識別に有効な波長帯域は変化することが認められた。しかしIRバンドはすべての高度で非常に有効であった。

10) 低高度(500 m)ではIRバンド以外にBおよびGバンドが有効であり，B, G, IRの3波長帯域の写真濃度から供試木の樹種を平均70.9%の的中率で判別できた。これら3バンドにRバンドを加えても判別的中率は向上せず，低高度においてはRバンドの効果が小さいことが知られた。

11) 撮影高度が1,000 mに上昇すると，Bバンドの効果は相対的に低下し，Rバンドと大差がなくなった。これは大気中における散乱がRバンドに比べてBバンドで大きくなるためと思われる。

12) さらに高度が2,000 m(縮尺1:20,000)に上昇すると，短波長のBバンドの樹種識別の効果は非常に小さくなり，さらにGバンドの効果も小さくなった。そしてRとIRの2バンド組み合わせによって供試プロットの樹種群を判別した場合の平均判別的中率は81.1%と非常に高いものになった。

13) 波長帯域別写真濃度による樹種識別の効果の大きい波長帯域組み合わせで作成したカラー写真ほど，樹種識別の効果が大きいことが確認され，樹種識別に最適のカラー写真を求める方法が明らかになった。

14) リアルカラー写真は樹種識別には有効でないことがわかった。

一般的に赤外カラー写真が優れていることが認められたし，撮影高度との関連でいえば，低高度ではB, G, IRの3バンドに，高高度ではR, IRの2バンドに感光する乳剤層をもつフォールスカラーフィルムが樹種識別に有効であることがうかがわれた。

15) カラー写真上の色彩を色度図上に表示して樹種判別を行う方法は，明るさのパラメータとして濃度を付加し，色彩を3次元座標として表示して判別する方法に比べ判別効果がかなり小さいことが認められた。

16) 写真判読の経験のない者でも判読しうる簡単な樹冠形，生育位置を肉眼判読し，これによって波長帯域別写真濃度あるいはカラー写真上の色彩から自動判読した結果をチェックす

ることにより，樹種識別の的中率は7%あるいは11%以上向上させうることが認められた。

17) 肉眼判読によって樹木を広葉樹と針葉樹に分類したのち，それぞれについて判別関数を構成して樹種を色調から自動判読し，その結果を肉眼判読によってチェックする方法も有効であった。

18) このような方法によって樹種識別に最適の航空写真をえることができ，さらに，その写真を用いて自動判読と肉眼判読を統一することにより，従来の樹種識別のもつ限界を克服しうることが確認された。

引用および参考文献

1) American Society of Photogrammerty (1960): Manual of Photographic Interpretation, Wisconsin.
2) American Society of Photogrammetry (1966): Manual of Photogrammetry, Wisconsin.
3) American Society of Photogrammetry (1968): Manual of Color Aerial Photography, Wisconsin.
4) BECKING, R. W. (1959): Forestry Applications of Aerial Color Photography, Photogram. Eng. **36**, 5, 483-490.
5) 千広俊幸 (1966): 天然林の類型区分について，北方林業, **18**, 6, 158-162.
6) 長　正道・木梨謙吉・末　勝海 (1967): 航空写真濃度測定による蓄積推定の研究 (III), 樹種と写真濃度の関係, 第78回日林講, 52-54.
7) 長　正道・木梨謙吉 (1968): 航空写真濃度測定による蓄積推定の研究 (VII), 樹種, 林齢, 密度等の諸要因に対する濃度波形グラフの分析, 第79回日林講, 36-38.
8) 長　正道 (1974): 空中写真濃度計測による森林蓄積の推定に関する研究，九大演報, 48, 113-292.
9) Commitee on Remote Sensing for Agricultural Purposes (1970): Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry, National Academy of Sciences, Washington, D. C.
10) CONDIT, H. R. and GRUM, F. (1964): Spectral Energy Distribution of Daylight, Journal of the Optical Society of America, **54**, 7, 937-944.
11) 江森康文・安田嘉純・宮沢　寛 (1973): 赤外カラーフィルムの表示色による樹種および活力度の判別, 写真測量, **12**, 3, 13-22.
12) 江森康文・安田嘉純 (1974): フィールドにおける分光反射測定, Remote Sensing, キャノン株式会社, 297-316.
13) Eastman Kodak Co.: Kodakt aerial film and photographic plates, Kodak Publicaion No. M-16.
14) Eastman Kodak Co.: Kodak filters for scientific and technical uses, Kodak Publication No. B-3.
15) FRITZ, N. L. (1967): Optimum methods for using infraredsensitive color film, Photogram. Eng. **33**, 10, 1128-1138.
16) 後藤昌司 (1973): 多変量データの解析法，科学情報社.
17) 原　忠平 (1942): 航空写真による森林調査，林友, **1**, 3, 54-67.
18) 橋本寿生 (1943): 航空写真による施業案編成，山林, 723, 29-36.
19) 橋本寿生 (1944): 航空写真測量を応用せる民有林施業案編成，日林誌, **26**, 2, 64-67.
20) 畠村良二・高田和彦 (1973): 空中写真濃度による樹種の自動判読，第84回日林講, 82-83.
21) 林知己夫 (1974): 数量化の方法，東洋経済新報社.
22) 菱沼勇之助・谷口信一 (1975): マルチスペクトル写真のバンド別濃度特性と合成写真の作成，森林航測, 107, 16-20.

23) 堀 正之 (1955): 航空写真による森林調査, 林野庁.
24) 淵本正隆・山本 博・木口 悟 (1973): マルチバンド写真の数値処理システム—土地利用の判別を例として—, 写真測量, **12**, 2, 8-16.
25) 今永正明 (1973): 航空林分材積表に関する研究, 山形大学紀要 (農学), **6**, 4, 57-125.
26) 板垣恒夫・合沢義孝・谷口信一 (1968): 航空写真による樹種の判読について, 日林北支講, **17**, 40-43.
27) 板垣恒夫 (1974): デジタルカラー写真による林相判読—樹種と写真濃度—, 第85回日林講, 41-43.
28) 板井秀夫 (1935): 航空写真に依る樺太の森林調査に就て, 日林誌, **17**, 6, 457-468.
29) 岩崎直人抄訳 (1936), モロゾフ: 森林学, 熊本営林局.
30) 鏑木徳二 (1925): 林業上飛行機写真の利用, 北海道林業会報, **23**, 1, 21-24.
31) 鏑木徳二 (1928): 森林立地学, 養賢堂.
32) 神山雅英 (1959): 写真家のための光学, 槙書店.
33) 加藤 紀・伊藤勇二・高梨幸雄 (1973): マルチスペクトル解析用ビューワー, キャノン MSV-300, 映像情報, **5**, 6, 71-73.
34) 小木和彦 (1972): デジタルカラーによる林相判読の試み, 北方林業, **24**, 5, 20-22.
35) 久保田広・浮田祐吉・会田軍太夫 (編) (1975): 光学技術ハンドブック, 朝倉書店.
36) Laboratory for Agriculture Remote Sensing (1968): Remote Multispectral Sensing in Agriculture, Purdue University Anual Report, **3**, 3.
37) LESCHACK, L. A. (1971): ADP of Forest Imagery, Photogram. Eng., **37**, 8, 885-896.
38) LOETSCH, F. and HALLER, K. E. (1964): Forest Inventory, Vol. 1.
39) 牧野道幸 (1963): 北海道の林業立地に関する研究, 帯広営林局.
40) 長嶋 郁 (1957): 航空写真による樹種判読の一考察, 第67回日林講, 92-95.
41) 中島 巌 (1961): 森林航測概要, 地球出版.
42) 中島 巌 (1961): 標本調査を目的とした林型の図化に関する研究, 林試研報, 129, 161-170.
43) 中島 巌・長谷川訓子 (1962): 林型の相違による航空写真像の濃度測定と解析法 (予報), 林試研報, 141, 31-49.
44) 中島 巌・栗屋仁志・樋渡幸男・長谷川訓子 (1962): 航空写真による林相区分図の作成と材積調査法の研究 (I), 林試研報, 146, 33-82.
45) 中島 巌 (1965): 航空写真による新しい森林のしらべ方, 林業科学技術振興所.
46) 中島 巌: 各種航空写真の林形判別に対する効果, 昭和39年度林業試験場年報, 49-51.
47) 中島 巌・樋渡幸男・長谷川訓子・大貫仁人 (1970): 天然林の調査法に関する研究, 北海道トムラウシ天然林の調査, 林試研報, 227, 83-147.
48) 中島 巌 (1973): 空中写真利用による森材調査法に関する研究, 林試研報, 251, 1-253.
49) 中山博一 (1936): 空中写真による森林調査 II, 森林基本調査の一方法としての平地林調査, 宇都宮高等農林学校学術報告第1輯, **2**, 4, 109-126.
50) 中山博一 (1957): 林木材積測定学, 金原出版.
51) NEUMANN, C. (1933-1934): Beitrag zur Vorratsermittlung aus Luftmessbildern, Zeitschrift für Weltforstwirtschaft **1**, 2/3・4/5, 147-158・195-233.
52) 日本林業技術協会測量指導部 (1957): 空中写真による樹種の判読実験例, 森林航測, 3, 8-9.
53) 日本林業技術協会森林航測研究会 (1969): 満州における航空写真利用の森林調査, 写真測量, **8**, 2, 96-101.
54) 日本林業技術協会 (編) (1970): 森林航測ハンドブック, 日林協.
55) 西尾元充 (1971): だれにもわかる写真測量, オーム社.
56) 西尾元充 (1973): 写真応用技術シリーズ (13・14), 写真工業, **31**, 1・2.
57) 西尾元充 (1973): コクサイ・マルチスペクトルカメラ II 型について, 映像情報, **5**, 6, 69-70.
58) 西尾元充 (1974): マルチスペクトル写真の開発と応用, Remote Sensing, キャノン株式会社, 407-452.
59) NORTHROP, K. G. and JHONSON, E. W. (1970): Forest Cover Tree Identification, Photogram. Eng., **36**, 5, 483-490.
60) 大金永治・伏見啓治 (1973): デジタルカラー写真による林相ならびに林型の判定, 林, 3, 1-7.

61) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉沢 正 (1973): 多変量解析法, 日科技連.
62) OLSON, C. E. and GOOD, R. E. (1962): Seasonal Changes in Light Reflectance from Forest Vegetation, Photogram. Eng., **28**, 1, 107-114.
63) 大貫仁人 (1970): 未開発林の調査と評価法に関する総合的研究 (II), 黒岳天然生林の写真濃度による樹種判定, 写真判読の自動化 (3), 第81回日林講, 89-91.
64) ORR, D. G. (1968): Multiband-color photography, Manual of Color Aerial Photography, American Society of Photogrammetry, 441-450.
65) 大隅真一 (1968): 森林経営の立場における林分構造の解析について—その意義と方法—, 第79回日林講, 60-61.
66) 大友栄松・ほか7名 (1959): 森林資源調査法の研究 (第1報), 航空写真を利用した標本抽出調査法の研究 (1), 林試研報, 114, 1-32.
67) 尾崎幸男 (1968): 写真測量概説, 森北出版.
68) PARRY, J. T., COWAN, W. R. and HEGINBOTTOM, J. A. (1969): Color for Coniferous Forest Species, Photogram. Eng., **35**, 7, 669-678.
69) ROHDE, W. G. and OLSON, C. E. (1972): Multispectral Sensing of Forest Tree Species, Photogram. Eng., **38**, 12, 1209-1215.
70) RYKER, H. C. (1933): Aerial Photography: Method of Determining Timber Species, The Timberman, **34**, 3, 11-17.
71) 佐藤 久 (1955): 空中写真による土地調査と写真の判読, 古今書院.
72) 千村伯夫・千村速男 (1970): 空中写真による樹種判読の方法と手がかり, 長野林友, 2, 51-61.
73) 森林調査研究会 (編) (1965): 例解森林調査の実務, 地球出版.
74) 森林航測編集室 (訳) (1959), POPE, R.: 森林測定の精度と写真縮尺の関係について, 森林航測, 12, 13-15.
75) SPURR, S. H. (1948): Aerial Photographs in Forestry, Ronald press, N. Y..
76) 鈴木酉雄 (1940): 満州国に於ける森林航空写真の現況, 第50回日林講, 265-270.
77) 高田和彦・成田 茂・中島 巌 (1968): 数量化法の航空写真材積推定への応用, 新潟大演報, 3, 31-35.
78) 高橋教夫・谷口信一・板垣恒夫・菱沼勇之助 (1973): 赤外線写真の濃度と林分構造, 日林北支講, 22, 7-10.
79) 高橋教夫・谷口信一・板垣恒夫・菱沼勇之助 (1975): 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, 89-90.
80) 高畑 滋 (1972): 植物の反射スペクトル特性について, 写真測量, **11**, 4, 13-19.
81) 竹内孫次 (1938): 満州国の森林調査に就て, 第48回日林講, 285-291.
82) 谷口信一 (1961): 航空写真による森林調査 (英文), 北大演報, **21**, 1, 1-80.
83) 谷口信一 (1968): 森林調査論の基礎的課題 (講義資料).
84) 谷口信一・石川善朗・菱沼勇之助・板垣恒夫 (1969): 林分の分類とその作業法の予察 (第1報～第3報), 日林北支講, 18, 15-26.
85) 寺島光一郎 (1974): 林野における空中写真撮影・解析のシステム化について, 昭和48年度林野庁長期委託研修報告書 (7), 林野庁.
86) 津村昌一 (1925): 森林に対する見方及び扱ひ方, 北海道林業会.
87) WASTENSON, L., KLEVEMARK, E. and HOLMGREN, B. (1972): Photo Interpretation of Tree Species, Aquatic Macrophytes and Bedrock Outcrops, Svensk Lantmäteritidskrift, 64.
88) 渡辺定元・折井静子 (訳) (1964-1965), アレクチェフ V. A. and ベロフ S. V.: 西部ウクライナにおける森林およびその他空中写真対象物の反射スペクトル能について, 森林航測, 45・46・47.
89) WITTGENSTEIN, L. S. (1961): Recognition of Tree Species on Air Photographs by Crown Characteristics, Photogram. Eng., **27**, 5, 792-809.
90) 安田嘉純・江森康文 (1974): マルチスペクトル画像の構造と補正, Remote Sensing, キャノン株式会社, 317-334.
91) YOST, E. F. and WENDEROTH, S. (1967): Multispectral Color Aerial Photography, Photogram. Eng., **33**, 9, 1020-1033.

92) YOST, E. F. and WENDEROTH, S. (1971): Multispetral Color for Agriculture and Forestry, Photogram. Eng., **37**, 6, 590-604.
93) ZSILINSZKY, V. G. (1962-1964): The Practice of Photo Interpretation for a Forest Inventory, Photogrammetria, **19**, 5.
94) ZSILINSZKY, V. G. (1966): Photographic Interpretation of Tree Species in Ontario, Department of Lands and Forests, Ontario.

Summary

The identification of tree species by aerial photographs is greately influenced by various conditions of photographs. Especially, kinds of films and flight altitudes are important factors which determine essential characteristics of aerial photographs.

On the other hand, various trainings and experiences concerned with interpreters are absolutely necessary for tree species identification from aerial photographs. Recently, some reserch works on the automatical identification of tree species became to be carried out. However, their accuracy is still not satisfactory, because only gray or color tone has been used in these research works.

The author wishes to make clear the following two items, namely, one of them is to find out the most effective kind of film and flight altitude for identifying tree species. The other one is to reserch the technology of tree species identification which many foresters can easily utilize.

1) Various films such as black-and-white infrared, real color and color infrared have been already developed, furthermore, false color films except types above-mentioned will be also developed in near future. Black-and-white films have one emulsion layer and color films have two or three emulsion layers. A film type is determined by combinations of emulsion layers recorded a constant spectral band in an electromagnetic wave reflected from a land surface. Accordingly, it is greately important to make clear an effective combination of spectral bands for identifying tree species. The most effective film was obtained theoretically through the treatment above-mentioned.

2) In mid-July, the multispectral camera was utilized to obtain the following four spectral band photographs; B (400～500 nm), G (500～600 nm), R (600～700 nm), and IR (700～900 nm). The flight altitude was transfered to the following three steps; 500 meters (1 : 5,000 scale), 1,000 meters (1 : 10,000 scale), and 2,000 meters (1 : 20,000 scale). Thus, the author utilized the photographs at flight altitude of 500 and 1,000 meters to identify a single tree species and utilized one at flight altitude of 2,000 meters to identify tree species of forest stand.

3) 257 sample trees ranged to nine tree species were selected depending upon the ground survaying. These sample trees were accurately transfered to photographs at flight altitude of 500 and 1,000 meters. In addition to this treatment, 100 sample plots ranged to six tree-species-groups were also selected and were transfered to photographs at flight altitude of 2,000 meters. Each plot in this case corresponds to the circle with a radius of 20 meters on the ground.

4) The following keys have been using for the identification of tree soecies: morphological characteristics, ecological characteristics, and spectral reflectance characteristics of tree species. Morphological characteristics such as crown shape and tree height, and ecological characteristics such as site and association do not make any fundamental difference in each spectral band.

The spectral reflective characteristics are recorded as photographic tones on aerial photographs, and photographic tones are generally different in each spectral band. Accordingly, the author recognized that effective bands for identifying tree species should be selected only according to spectral reflective characteristics — photographic tones.

5) To bigine with, the author measured photographic densities of sample trees and plots on B, G, R and IR band photographs and then computed discriminant functions based on these data and lastly statistically discriminated tree species of sample trees or plots by using these functions. In this case, there are eleven combinations of spectral bands such as B×G×R×IR, B×G×IR, G×R, and so on. A discrimination of tree species was carried out about each combination. As for the effectiveness of identification, eleven combinations of spectral bands were compared with each other by the percentage of correct discriminations. Through this treatment, the author estimated the most effective combination of spectral bands for identifying tree species.

6) At flight altitude of 500 meters, B×G×IR band was remarkably effective. Sample trees ranged to nine tree species were discriminated from photographic densities on these three band photographs and its average percentage of correct discriminations was 70.9 percent. Notwithstanding R band was added to three bands above-mentioned, its classification accuracy was only 70.5 percent.

7) In the case of discrimination from four band photographs at flight altitude of 1,000 meters, its classification accuracy was 63.2 percent. Though G×R×IR band showed the highest classification accuracy among three bands, this value was almost equivalent to the case of B×G×IR band.

8) In the case of identifying sample plots ranged to six groups of tree species at flight altitude of 2,000 meters, R×IR band was effective and its average percentage of correct discriminations was 81.1 percent. Notwithstanding B band was added to R×IR, its classification accuracy did not increase.

9) The author recognized that effective spectral bands for identifying tree species varied with flight altitude and even if more bands were used, its classification accuracy did not always increase.

IR band was remarkably useful at all flight altitudes and B band at low altitude. As far as this research work is concerned, the author convinces that B band is effective for identifying tree species at lower flight altitude than 1,000 meters. On the other hand, R band is greately useful at higher altiude than 2,000 meters. Although G band shows a tendency to decrease the effectiveness with increasing flight altitude, this tendency is not so clear as compared with that of B band.

10) Real color photograph and four kinds of false-color photographs including color infrared were produced by additive color viewer from the four black-and-white spectral positives, and the effectiveness of these color photographs were compared with each other. Through this treatment, the author also realized that the color photographs based on the combination of bands which showed high average percentage of correct discriminations was highly effective for identifying tree species.

Color infrared photograph is useful at all flight altitudes. Furthermore, false-color photograph with blue-, green- and infrared-sensitive layers is useful at low altitude and the one with red- and infrared-sensitive layers at high altitude.

11) Using a simple stereoscopic vision with color measurment, the accuracy of tree species identification increased to some extend.

To begine with, sample trees were separated into softwoods and hardwoods by interpretating the characteristic of crown shape and all sample trees were correctly separated on false-color photograph produced from B, G and IR band positives at flight altitude of 500 meters.

Then, discriminant functions in order to identify the content of both softwood and hardwood were computed from their color measurement data. Four softwood species and five hardwood species were separately discriminated by using these functions. The average percentage of correct discrimination in this case was 71.3 percent, on the other hand, in the case of discrimination used color measurement alone, its classification accuracy was 64.1 percent.

After that, the author distinguished whether the locations of sample trees were marsh land or not. If the locations of trees identified were inconsistent with the most suitable place for discriminated species, these trees were treated as those which were impossible to identify. Thus, this important location was added to color and crown shape as photo-interpretation keys for tree species, and as the result of this treatment, the average percentage of correct interpretations increased 5.9 percent.

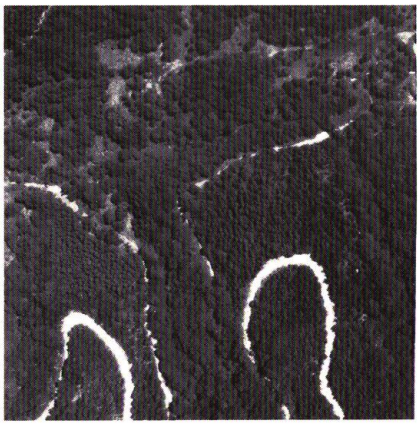
12) Notwithstanding simple interpretation keys such as crown shape and location were, the interpretation accuracy being added to these factors fairly increased. Accordingly, it is expected that the difficulties of tree species identification are overcomed by using other morphological and ecological characteristics with color measurement.

13) The image chromaticities of sample trees on color infrared photographs at flight altitude of 500 meters were measured and were displayed on the CIE 1960-UCS diagram. Discriminant functions which used the chromaticity coordinates u and v as variables to discriminate nine tree species were computed and the average percentage of correct discriminations was 53.7 percent. Furthermore, the lightness of color image which falls on photographic density was added to above-mentioned variables and this new discriminant functions were recomputed. The classification accuracy used these functions was 65.3 percent.

In addition to this treatment, sample plots on color infrared photographs at flight altitude of 2,000 meters were also analized in the same way above-mentioned. The classification accuracy depended upon discriminant functions used u and v as variables was 55.0 percent, and the classification accuracy used u, v and density as variables was 80.6 percent. Accordingly, the author recognized that three dimensional expression of color which fell on the chromaticity coordinates and lightness was better than the result of using color diagram.

B band

G band



R band

IR band

7·(1)

写真—7　マルチスペクトル写真と合成カラー写真の例
(撮影高度 500 m)

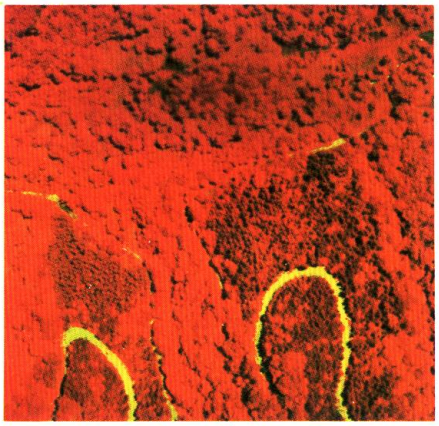
Photo 7.　Examples of multispectral photograph and composed color photographs (at flight altitude of 500 m)

(1)　マルチスペクトル写真　Multispectral photograph
(2)　B×G×R (b×g×r) 合成リアルカラー写真　Composed real color photograph
(3)　G×R×IR (b×g×r) 合成赤外カラー写真　Composed infrared color photograph
(4)　B×G×IR (b×g×r) 合成フォールスカラー写真　Composed false color photograph
(5)　B×IR (g×r) 合成フォールスカラー写真　Composed false color photograph
(6)　R×IR (g×r) 合成フォールスカラー写真　Composed false color photograph

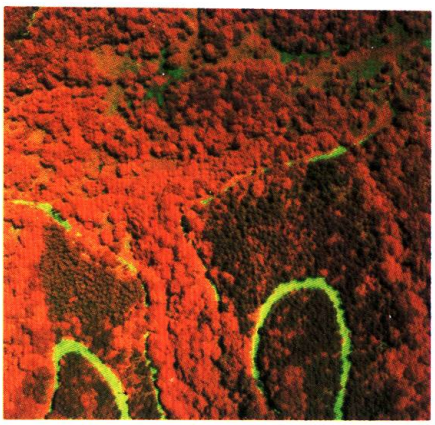
7・(2)

7・(3)

7・(4)



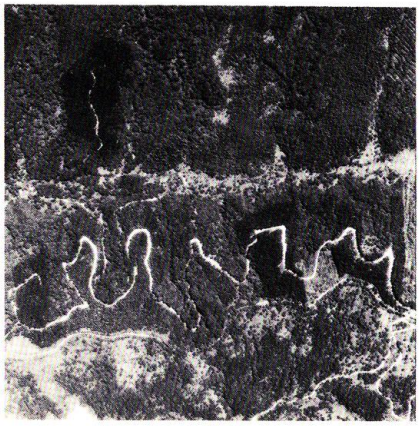
7・(5)



7・(6)

B band

G band



R band

IR band

8·(1)

写真—8　マルチスペクトル写真と合成カラー写真の例
(撮影高度 2,000 m)

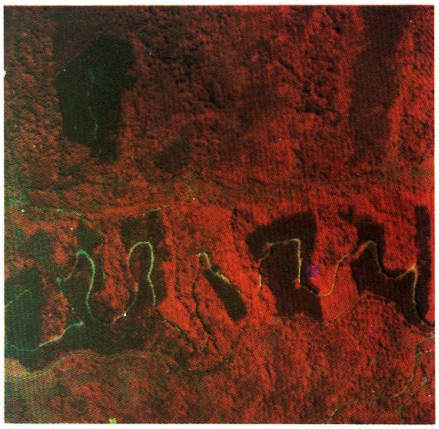
Photo 8.　Examples of multispectral photograph and composed color photographs (at flight altitude of 2,000 m)

(1) マルチスペクトル写真　Multispectral photograph
(2) B×G×R (b×g×r) 合成リアルカラー写真　Composed real color photograph
(3) G×R×IR (b×g×r) 合成赤外カラー写真　Composed infrared color photograph
(4) B×G×IR (b×g×r) 合成フォールスカラー写真　Composed false color photograph
(5) B×IR (g×r) 合成フォールスカラー写真　Composed false color photograph
(6) R×IR (g×r) 合成フォールスカラー写真　Composed false color photograph

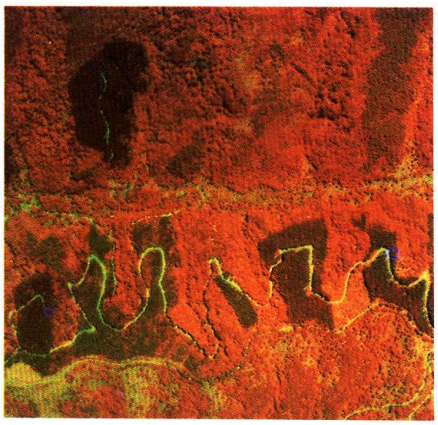
8・(2)

8・(3)

8・(4)



8・(5)



8・(6)