



Title	航空写真による森林の健全性の識別に関する研究
Author(s)	菱沼, 勇之助; HISHINUMA, Yunosuke
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 36(1), 1-77
Issue Date	1979-03
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/21001">https://hdl.handle.net/2115/21001</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	36(1)_P1-77.pdf



# 航空写真による森林の健全性の 識別に関する研究\*

菱沼勇之助\*\*

Studies on the Identification of the Stand Vigorous  
Grade in Natural Forest by Aerial Photographs\*

By

Yunosuke HISHINUMA\*\*

## 目 次

まえがき .....	2
第1章 緒 論 .....	3
第2章 研究の目的および方法 .....	5
第1節 研究の意義 .....	5
第2節 研究の目的 .....	6
第3節 研究の方法 .....	7
第3章 研究の歴史 .....	8
第1節 戦前期の研究 .....	8
第2節 戦後期の研究 .....	9
第3節 従来の研究における問題点 .....	14
第4章 健全性の概念 .....	15
第5章 樹木の健全性 .....	17
第1節 健全性の評価方法 .....	17
第2節 樹木の健全性とスペクトル反射 .....	18
第3節 樹木の健全性とマルチスペクトル写真 .....	19
第4節 研究の手順 .....	21
1. 写真撮影 .....	22
2. 写真合成 (1) .....	23
3. 地上調査 .....	23
4. 写真判読 .....	24
5. 濃度測定 .....	25
6. 濃度による判別 .....	26
7. 写真合成 (2) .....	27
8. 色度測定 .....	28

\* 1978年7月31日受理

\*\* 北海道大学農学部附属演習林

\*\* Experiment Forest, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

9. 色彩による判別 .....	29
10. 判別効果の吟味 .....	29
第5節 研究の結果 .....	29
1. 地上調査 .....	29
2. 濃度による判別 .....	29
3. 樹冠断面積および樹高と濃度の組合わせによる識別 .....	37
4. 色彩による判別 .....	40
第6節 樹木の健全性の識別に関するまとめ .....	44
第6章 天然林の健全性 .....	45
第1節 樹木の健全性と林分の健全性との関連 .....	45
第2節 林分の健全性の評価方法 .....	47
第3節 研究の手順 .....	48
1. 写真撮影 .....	48
2. 林分の分割単位 .....	49
3. 地帯区分 .....	52
4. 林分分類 .....	53
5. 地上調査 .....	53
6. 健全性の評価 .....	53
7. 濃度測定 .....	54
8. 写真合成 .....	54
9. 色度測定 .....	54
10. 識別効果の吟味 .....	54
第4節 研究の結果 .....	55
1. 地上調査 .....	55
2. 濃度による判別 .....	61
3. 色彩による判別 .....	64
第5節 天然林の健全性の識別に関するまとめ .....	66
第7章 結 論 .....	67
引用および参考文献 .....	71

## ま え が き

航空写真を用いて、樹木や森林の健全性を把握するための研究が、近年にわかに注目されるようになった。このことは、1970年代に入って、森林施業計画や自然環境の認識のために、森林の質的構成要素としての、樹種構成や健全性などの把握が重要視されるようになったことに依拠している。

筆者は、このような質的構成要素のうち、健全性を把握する方法をみいだすための研究を1967年以降積極的にすすめてきた。一方、航空写真による森林調査においては、従来から高度の熟練度をもった判読者によるところが大であった。しかし、ここで、健全性の識別の自動化への途を探ることができれば、この分野に貢献するところ大である。

また、このような識別は、北海道に広く分布する天然林に適用することに重要な意義をみ

いたすものである。したがって、この天然林がもつ、地形的条件の多様性および林木構成の複雑性を十分に考慮した研究でなければならない。

そこで筆者は、航空写真の濃度や色彩を、健全性にのみ収斂させる方法を探り、これにもとづいて、識別の自動化への途を探った。

本研究のとりまとめについて、終始懇切な御指導を賜った北海道大学谷口信一名誉教授、同武藤憲由教授、同東三郎教授、同大金永治助教授に衷心より感謝申し上げる。

また、研究遂行の過程において、種々御援助を戴いた北海道大学附属演習林板垣恒夫技官、地上調査に便宜を御取計らい戴いた同中川地方演習林長藤原滉一郎助教授、有益なる御教示を戴いた千葉大学工学部天然色工学研究施設江森康文教授、同安田嘉純講師、北海海道大学工学部村田和美教授、写真撮影に御協力を戴いた西尾画像工学研究所西尾元充博士、写真合成に御協力を戴いた農林省北海道農業試験場高畑滋主任研究官に対し深謝の意を表する。

## 第1章 緒 論

森林調査における航空写真の利用は、国の内外を問わず、1910年代から始められた。その当初は、広大な地域に分布する森林の位置や、広がりを見つめることに主眼がおかれていた。その後、第2次世界大戦の終戦(1945年)を期として、急速に航空写真の利用がすすめられ、現在に至っている。とりわけ、我が国においては、1958年以降、国有林の経営単位の拡大を契機として、その利用にめざましい展開がみられはじめた。しかし、これらの大部分は、森林の蓄積・生長量などの量的把握に中心がおかれていた。さらに、この時期は高度の経済成長を背景として、木材の需要が増大し、大量の林木伐採が進行していた。その結果、1970年代に入ってから、自然環境の破壊に対する国民的批判の高まりと共に、森林の公益的機能の再認識があらためて問われはじめようになった。このことは、森林施業計画の前業としての森林調査が、蓄積や生長量の把握のみにとどまらず、その質的構成を明確にし、森林内容の健全化と、これがもつ諸機能の多目的利用を期待しようとするあらわれでもあった。

森林調査における航空写真利用の利点は、調査の迅速性、記録性、客観性および調査経費の節減などである<sup>1),2),3)</sup>。これらは、写真像がもつ形状、大きさ、濃度および肌理、そしてこれらが作りだすパターンなどの特性を効果的に利用することによってもたらされるものである。しかし、航空写真そのものは、もともと撮影時における一瞬間の地上の現象を総括的にとらえたものであり、撮影地域の地形や森林の状態を、フィルム上に再現したものにはすぎない。ところが、谷口<sup>1)</sup>が指摘しているごとく、従来の写真利用の分野での教科書および普及書などにおいては、上記のごとき写真がもつ諸特性によって、すべての地上の諸情報を、迅速に、かつ容易に把握できるがごとく印象を与えてきた。

しかし、航空写真は、このような万能なものではない。ここで、前記のごとき写真がもつ諸特性にもとづき、広域な地域に分布する森林の内容を解析しようとする場合、撮影された数

多くの連続写真を用いることによって、写真の利用効果をより大ならしめることができる。すなわち、谷口<sup>1)</sup>が述べているごとく、写真自体がもつ立体幾何学的な原理を理解し、いわゆる立体視により、平面的利用から、奥行きのある立体的利用が、何よりも肝要である。このことは、それが森林内容の量的把握であれ、また質的なものであれ、特に重要な点である。ところが、近年における航空写真の利用にかかわる諸研究、および技術を総括的にみると、濃度測定技術、カラー写真の開発などを背景として、計測技術のめざましい展開が認められるものの、それらの成果が、航空写真の利用において一貫した技術として体系化されていない。このことは、航空写真の利用の分野における諸研究や技術の発展が断続的なものにとどまり、継承性のないものであったことにほかならない。

航空写真による森林の健全性の把握にあたっては、従来この種研究において、濃度や色彩に依存する客観的手法の採用が検討されてきた。ここで、筆者は航空写真利用の本来的あり方である立体視による判読法を、濃度や色彩による自動判別法にあわせ加えることにより、写真利用の効果をより向上させようことを期待した。

さらに、森林の健全性の把握に関しては、ようやく研究の緒についたばかりであり、これからは上記の観点にたって、この種研究をいかなる方法・手順によってすすめるべきかを確立することが、筆者にとっての重要な課題である。また、この研究の主たる目的とするところは北海道に広く分布する天然林について、その健全性を知ることにある。しかし、ただちに天然林を対象に、この研究をすすめることには、いささか問題があるので、筆者はまず、植栽木を対象とした基礎的研究を積み上げることにした。すなわち、ここからえられた結果を天然林に敷衍し、その健全性を把握しようとするものである。

そして、この基礎的研究の結果、濃度や色彩によって、天然林の健全性を知るためには、それらの判別要素が健全性にのみ収斂するような前処理が必要とされる。このため、地形的特徴にもとづく地帯区分、および林分分類を行なうことの重要性を認めるにいたった。そしてこのことは、単に濃度条件を健全性に収斂させる役割を果すだけでなく、濃度による識別効果を向上させるために、最も重要なことである。さらに、地帯区分や林分分類を行なうにあたり、ここではメッシュ法を採用したが、この場合、その大きさをいかように定めるかが重要である。このことについて筆者は、モデル実験を行ない、健全性の違いが、濃度に敏感に反映する単位面積を求めて、この研究を発展させた。

さらに、この研究は、マルチスペクトル写真を用いてすすめられたものである。このことは、各バンド別写真ごとの濃度特性を知り、この種識別に適したバンド別組合わせを探るだけでなく、天然林の健全性を把握するためには、いかなる組合わせを選択すべきかについても検討を行なっている。このことは、従来赤外カラー写真が、この種の識別に最も適したものといわれてきたが、それが実際上正しいものであるか否かの吟味もふくまれるものである。そしてこの吟味に際しては、マルチスペクトル写真が、現在のところ最も有効な方法である。

これらの研究の結果、天然林の健全性を知るための方法と、識別の自動化への可能性を知ることができた。この研究は、ひとり天然林の健全性を知る端緒になりうるだけでなく、この研究方法の背景となった、立体視による判読法の重要性を再認識できたことである。

## 第2章 研究の目的および方法

### 第1節 研究の意義

森林施業計画の前業としての森林調査は、森林という生物社会の自然的条件の施業的視点からの把握を目的としている。したがって、この調査結果は、その施業計画における伐出および更新にかかわる諸計画ならびに作業種の選定、生産期間・収穫規整の決定などに十分資するものでなければならない。森林の調査にあたっては、地況と林況にわけて考察することができる。このうちの林況調査は、森林を構成する樹木あるいは林分につき、その樹種および健全性などの質的構成や、面積・胸高直径・樹高・樹冠直径・蓄積および生長量などの量的要素、下層植生の種類・その繁茂状態などを総括的に調査されたものである。ここで林分とは、森林のそれぞれにおいて、その構成が均一であり、他と容易に区別しうるものを、施業的視点から類型化した施業の単位である<sup>4),5)</sup>。

このような森林調査を、広範な森林に対して行なうにあたり、それが地上調査によるものである場合は、多数の人員で長期間にわたり、しかも地利不便な箇所での調査が要求されたり、また莫大な費用を要することがある。このため従来から、しばしば航空写真の利用がはかられている。とりわけ、北海道の森林は本州のそれと異なり、大部分が天然林であり、経営面積が広大であることに加えて、過去における調査資料が十分でないため、航空写真の利用がきわめて効果的である。

航空写真による林況の判読については、森林構成諸要素のうち、直接把握することのできないものがあるので、写真像のもつ濃度・肌理およびそれらによるパターンなどの特性にもとづき、立体視によって、樹高・樹冠直径および林分ごとの平均樹高・樹冠占領面積・立木本数・樹冠疎密度などを判読し、これらを媒介として間接的に蓄積・生長量などをもとめる方法が採用されている。このような諸要素の把握に関する研究にはみるべきものが多い。

一方、樹種や樹木の健全性などにかかる質的構成要素を、航空写真から識別する研究は、現在ようやく緒についたばかりであり、その技術はいまだ定着するにいたっていない。かかる質的構成要素の識別は、主として写真像の濃度・肌理および形状などに負うところが多いが、このことはこれらの要素と森林の質的構成要素との関連性がいまだ十分に解明されていなかったことに起因する。とりわけ、航空写真による樹木の健全性の把握のためには、健全性のグラウンド・トゥースをどのように定めるかが問題であった。

そこで従来から筆者は、写真像の判読要素を重視しつつ、樹木の健全性を概念的に規定し、

これにもとづく評価を行なってきた。そこで、この結果を航空写真の樹木像に対応させ、主にその濃度によって、健全性を識別することを主たる目標としてとりまとめたものである。しかもこの成果は、谷口・菱沼ら<sup>6)</sup>が鋭意研究しつづけている天然林施業への航空写真の利用を、より発展せしめるものである。

## 第2節 研究の目的

本研究の目的は、森林の健全性を、主として写真像の濃度によって識別し、あわせてこの識別の自動化の途をめざしている。この研究は、植栽木を対象とする基礎的なもの、およびその結果を天然林に敷衍する応用的なもの2つの分野からなっている。

従来からみられる写真像の濃度による林分諸要素の識別の多くは、その色調をよりどころとする肉眼判読が主流であったが、この場合判読者の熟練度によらざるをえず、いわば属人的性格をもつものであった。1960年以降における濃度計測機器類の開発にともない、客観的な識別を次第に可能にしつつある。すなわち、自動濃度計測装置による林分の樹種構成とその樹冠占領面積比率、樹冠疎密度などの測定<sup>7)</sup>、蓄積の推定<sup>8)</sup>ならびに樹種の識別<sup>9)</sup>、またデジタルカラー写真による人工林の地位判定<sup>10)</sup>、林型解析<sup>11)</sup>や林相判読<sup>12)</sup>などに関する諸研究がすすめられるようになった。しかし、森林に生育する樹木の健全性に関する限り、菱沼ら<sup>13),14)</sup>、渡辺<sup>15)</sup>、小野<sup>16),17)</sup>、江森・安田<sup>18)</sup>によるもののほか、特筆すべきものが少ない。

一方、濃度による林分諸要素の識別を、より客観的にするためには、いくつかの克服すべき課題がある。その第1は、林分の構成要素とりわけその健全性などの識別を、多様な立地条件のもとにあって、しかも樹種・樹齢の異なる樹木を、いかなる標識によって、どのように評価すべきかということである。これがこの種研究の基本的課題でもある。第2は、写真像が濃度に関連する写真光学的特性を、どのように解析していくかということである。これは、レンズの物理的構造によって生ずる周辺光量の違いや、地上の物体の受光角の違いが、濃度に影響を与えることに大きなかわりをもっている。さらに、技術的なものとして、現像・焼付のたびごとに変化する濃度条件があげられる。これらの諸要因は、現在のところ写真光学的に回避できないものであり、濃度による識別をより客観的にし、自動化の方途を探究するためには、上記のごとき諸要因にもとづく濃度条件を補正することが重要である。しかし、従来の研究における第1の課題については、どうにかそれぞれの目的に応じた処理がなされているようであるが、第2の課題については、今なお多くの問題が残されている。

つぎに、この研究は、樹木の健全性と、樹木の写真像がもつ濃度特性との関連性を知ることから開始されなければならない。しかし、この特性は、健全性によるだけでなく、樹種・樹齢・樹高および樹冠の大きさなどのほか、林分によっては、その林木構成・下層植生などの状態によって影響をうける。したがって、この種研究においては、健全性に関連をもつ濃度特性をいかに抽出するかが重要な問題である。このことについては、筆者らの研究<sup>13),14)</sup>によって、

マルチスペクトル写真の使用が有効であることが知られている。そこで、この種写真のバンド別濃度特性を健全性に関連させ、この結果にもとづき、まずこの識別に有効なバンド別写真の組み合わせを探究した。

さらに、高橋<sup>9)</sup>は上記のごとき手順をへて、樹種の識別に最も適合した合成写真を作成し、この写真を用いて、再び識別適合度の検証を行ない、カラーフィルム開発の将来を予測した。しかし、筆者の研究は、識別の自動化を目標の1つとしており、この種識別に適したバンド別写真の組み合わせによる判別関数を用いて、濃度による統計量を健全性に関連させて区分し、評価する手法の採用を提起している。この場合、大面積の森林を対象とする解析においては、数多くの判別関数の作成が必要となるが、最近のコンピューター利用の急速な開発にともない、既往の計算システムを用い、この算出が容易になってきている。

### 第3節 研究の方法

森林に生育する樹木および天然林の健全性の識別に関するこの種研究は、前節で述べたように、わが国においてはその緒についたばかりである。したがって、この研究の目的を達成するための方法の採択は、重要な課題の1つである。このため、ここではこの研究をすすめるための基本となる方法について概説し、その方法のよりどころや内容については、第5章および第6章において詳述する。

この基本的な方法の第1は、地上調査である。樹木の調査は、すべての供試木について、単木ごとに、健全性の識別に関する一定の評価基準にもとづいて評価している。天然林の調査は、あらかじめ写真上で分割されたメッシュを地上に転移し、標準地調査を行なうと同時に、すべてのメッシュ内に生育する不健全木を確認し、写真上に刺針している。

第2に、写真像の濃度特性を、樹木や天然林の健全性に関連させて把握し、バンド別組み合わせによる判別効果を吟味するため、マルチスペクトル・イメージ方式による写真撮影を行なっている。

第3に、濃度や色彩を、樹木や天然林の健全性にのみ収斂させるために、地帯区分を行なっている。

第4に、前項と同様、濃度や色彩を、天然林の健全性にのみ収斂させるために、林分分類を行なっている。

第5に、上記の地帯区分および林分分類を、あらかじめ写真上で分割されたメッシュごとに行なっている。この場合、メッシュの大きさは、モデル実験を行なった結果にもとづいて決定している。

第6に、健全性の識別の客観化を図るため、判別関数によって判別率を求め、これにより判別効果を吟味している。

### 第3章 研究の歴史

#### 第1節 戦前期の研究

写真像の濃度計測による森林諸要素の識別に関する研究は、前章で述べたごとく、1960年以降にはじまるが、その詳細についてふれる前に、この種研究の歴史を知る必要がある。航空写真の利用が活発化したのは、国の内外を問わず、1910年代以降であるが、わが国におけるその発展の歴史は、第2次世界大戦の終戦(1945年)を境として、戦前期と戦後期に大別される<sup>9),10)</sup>。しかもこの戦後期はさらに、測量への利用が中心であった1945年から1954年まで、森林調査への利用が具体的に変わった1962年まで、さらに濃度測定機器類の開発やカラー写真がとりあげられてきた1963年から1971年まで、さらには1972年以降の地球資源技術衛星の打ち上げを機とするマルチスペクトル写真の開発の4期にわけて考察することができる<sup>9)</sup>。筆者は、この時代区分にしたがって、航空写真の森林調査への利用、とりわけ樹木の健全性に関連をもつ諸要素の識別を中心として、その特徴的なものについてふれたい。

戦前期におけるこの種の利用は、1920年代からはじめられた。すなわち、1925年、鎬木<sup>20)</sup>が航空写真の林業への利用に関する論文を発表したのが最初であり、これは彼がドイツ林業組合大会において、林相図や施業図の作成、虫害・風雪害など諸災害の対応策のために利用することを述べたものである。しかし、具体的に航空写真をどのように利用するかについては明らかでない。1929年朝鮮総督府山林部<sup>7),9)</sup>が、国有林約11,000 haを縮尺約1/5,000で撮影し、林相図の作成および地況・林況調査を行なっているが、それが実際に利用されるまでにいたらなかった。しかしながら、このことはわが国における航空写真の利用を大いに刺激したものと見てよい。すなわち、1930年から1934年にかけて南樺太で全島の約70%におよぶ地域が、3回にわたり縮尺約1/15,000で撮影されている。この撮影の動機は、わが国が1905年に南樺太を領有してから、その主産業である製紙およびパルプ工業の利潤追求による大量伐採、さらには虫害の発生・頻繁な山火事の発生にともなう森林の荒廃を防ぎ、その回復を図るため、施業案の編成が行なわれた際、短期間に広大な森林を調査する必要性が生じたことによる。この場合の写真の利用は、林地区分と林況判読にあったが、このうちの後者については、樹種・林齢・樹高・立木本数および蓄積の推定などを、地上調査の併用によって可能にしようとするものであった。ここではとくに、虫害調査において、虫害による枯死木のみならず、樹葉の変化を識別したという興味ある説明がなされている。しかし、これら一連の計画実施後における問題提起<sup>7)</sup>によれば、樹種別蓄積分布の推定・生長量および伐期の調査、さらには良木・不良木の識別ならびに虫害の進行予測などは不可能とされている。このことは、前述のごとき諸要素の推定や識別の方法がまだまだ明確でなかったことに起因していると言ってよい。1933年、満州国において、航空写真の撮影計画が樹てられ、1934年から1944年までの間を3期に分け、縮

尺 1/15,000 で面積約 31,000 ha の森林を対象とする撮影が行なわれた。この撮影の動機は、満州国政府が、日本のパルプ工業の進出を図るため、ごく短期間に木材資源を把握することを前提としたものである。このための写真の利用は、地貌図や林相図の作製あるいは蓄積推定に主眼がおかれていた。これらのうち、林相図に関する竹内<sup>22)</sup>、鈴木<sup>23)</sup>の報告によると、樹冠の形状・色調・生立の位置による樹種判読および山火事跡地などにみられる枯損木の集団地などの区分が行なわれている。さらに蓄積調査は、原<sup>24)</sup>等によって行なわれたもので、写真を用いて標準地を設け、写真上で樹高・樹冠直径および林分の空間占領容積などの諸要素を測定し、これらと標準地の材積との関連性を求め、それぞれの標準地の写真像を判読要素として、つぎつぎと全林におよぼす方式で蓄積を推定した。以上のごとく、戦前期におけるわが国の航空写真の利用は、南樺太および満州国などの植民地で、広大な森林から多量の木材資源を取得する意図をもつものであり、この種の研究も平行的にすすめられていた。しかし、写真利用の目的が質より量に重点をおいていたため、樹木の健全性に関するものは、この期の後半において、わずかに山火事跡地などの枯損木を識別した程度のものである。また、国内では、1937年に中山<sup>25)</sup>が、『航空写真による森林調査』を刊行したが、ここでも樹木の健全性については、客観的な識別方法を明らかにしていない。

## 第2節 戦後期の研究

戦後期における航空写真の利用は、急速に活発化しつつある。とくに1952年の平和条約締結以降、わが国で航空写真の撮影が可能になってからは、判読方法の向上、判読器機種の改良と開発、さらにはフィルムやカメラの改良などを基盤として、航空写真の利用は、地形測量や森林調査のみにとどまらず、土地利用、海洋調査や都市環境調査などの広範な分野へと拡大されつつある。しかも、この利用拡大を裏付ける判読方法は、およそ数年間ごとにかんがりの発展をしつつけている。この経過を、筆者は高橋<sup>9)</sup>による時代区分を参照して、4期に分けて考察してみた。

第1期 (1945~1954年); この期間の大半を占める1952年までは、連合軍による被占領期にあたり、わが国での飛行および撮影が禁止されていたし、米空軍は1947年および1948年の2カ年で、全国を縮尺1/40,000で写真撮影を行ない、わが国への貸与を認めた。そこで林野局(現林野庁)は、この写真を用い、民有林施業案の編成のため必要とする基本図(地貌図)の作製を企画し、林業試験場・日本林業技術協会などの協力を要請して、面積180万ha、縮尺1/5,000の地性線図の作製を1952年までに完了している。1952年、講和条約の締結により、わが国の自主的写真撮影が可能となり、林野庁はただちに東京都の水源林の一部を、縮尺1/10,000で戦後初の撮影を行なった<sup>7),9)</sup>。同時に、上記の写真を用い、林相判読や蓄積推定に関する試験研究が行なわれている<sup>26)</sup>。1953年から1954年にかけて、測量会社が新鋭の航空カメラや図化機を購入し、地形図の作成が積極的になされはじめた。一方、この森林調査への利用に関して

は、新しい手法を取り入れるための検討がようやくなされるようになった<sup>27),28)</sup>。以上のごとく、戦後期の第1期は、その大半の期間において、わが国の飛行および撮影が許されず、米空軍が撮影した写真を使用せざるをえないという制約によって、戦前期に醸成されつつあった森林調査への航空写真の利用が一時中断され、すべてが再びこの検討から開始せざるをえない実情にあったといえる。このため、地性線の図化などの地形測量が、航空写真利用の中心をなしていたが、それとでもその後の図化技術からみれば、ごく初歩的なものにすぎなかった。

第2期(1955~1962年); 1954年北海道を襲った15号台風により、国有林を中心として、未曾有の風倒被害木が生じ、その量は27,000万 $\text{m}^3$ に達した<sup>9)</sup>。この被害状況の把握と風倒処理計画を樹てるため、翌1955年国有林は、縮尺1/20,000で大規模な航空写真撮影を行なった。これは、樹木の健全性の識別に関連をもつものとして、注目に価する事業であった。しかし、かかる目的のために、どのように有効にこの写真が利用されたかは明らかでない。この写真撮影が、翌1956年からの大規模な撮影事業の契機となり、航空写真を利用した標準地調査の設定と、その地上調査の結果にもとづく比較判読により、蓄積を推定するいわゆる比較法<sup>28)</sup>が生みだされた。また、1956年からはじまった大規模な航空写真利用の背景には、1957年の長期生産計画にもとづく生産力増強計画のなかで、奥地林の開発という名のもとに、大面積の森林を伐採し、針葉樹を主とした人工林化への意図が認められる<sup>29)</sup>。翌1958年には、国有林野経営規程の改正により、保統単位の拡大と生長量を上廻る標準年伐量の増大が決定をみている。このような背景のなかで撮影された航空写真の利用は、専ら森林の蓄積推定などの量的把握に重点がおかれていた。すなわち、林野庁では1949年に航空写真測量の講習会のために作成した教本を改訂して、1955年に『航空写真による森林調査』を編纂<sup>30)</sup>し、さらに1959年に片岡<sup>31)</sup>が森林調査の実務解説書を刊行している。しかし、この段階での航空写真の利用は、人工林と天然林の林地区分、樹冠の形状と大きさおよび色調などによる樹種区分、人工林を主とする林齢区分による林相判読にあり、この結果を利用したサンプリング調査によって、蓄積の推定が行なわれている。1959年に大友<sup>32)</sup>は、前記片岡の林地区分のうち、天然林をさらに針葉樹林、広葉樹林および針広混交林に3区分することにより、サンプリング調査の効果の向上をはかっている。1960年および1961年の両年にわたり、谷口<sup>33),34)</sup>は航空写真による森林調査について発表した。これは、写真の立体視を重視しつつ、林木の樹種・樹高・樹冠直径などの諸要素を判読するための手法を明らかにし、さらに林分分類の方法、ならびに林木蓄積査定法における航空樹木および林分材積表の作成と、それらを森林調査に適用した成果を、具体的かつ詳細に論述したものである。さらにこれらのほか、地形による地位の分類方法や航空写真から直接測定可能な樹高と樹冠直径の比にもとづく地位の判定方法を提示していることは、これまでの研究になかったもので、立体視の重要性とあわせて、特筆すべきことである。また、1961年、木梨・長<sup>35)</sup>が航空樹木材積表の作成方法について述べ、同年木梨<sup>36)</sup>、大島<sup>37)</sup>も航空写真による蓄積推定誤差について報告している。同じくこの年、中島<sup>2)</sup>は『森林航測概要』を刊行し

た。1962年、谷口<sup>38)</sup>は、北海道大学天塩地方演習林全面積約23,000 haの森林調査を、航空写真を利用して行なっている。これは同氏の研究の成果を大面積の森林に適用したもので、この成果は、同地方演習林の施業案編成のために使用された。さらに同年、中島<sup>39)</sup>は写真像の濃度計測による林型区分に関する判読手法を、1959年には天然色および赤外線写真をそれぞれ検討しはじめている<sup>40),41)</sup>。このように、第2期には、わが国における大規模な航空写真の撮影が、戦後はじめて開始され、その利用に関する研究や調査に大きく貢献した。この撮影の直接的な動機となったものは、北海道を襲った15号台風の被害状況の調査であったが、大量の木材を取得することを目標とした林政的背景のためか、風倒被害の状況を、森林の質的要素の把握という観点から、科学的に判読することなく、専ら森林の蓄積推定にその主要な課題を求めた。このなかであって、この種の研究にはみるべきものが多く、とりわけ谷口のそれは、蓄積推定の手法の確立のために、大きく貢献したといつてよい。

第3期(1963~1971年);この期に入っても、蓄積推定についての研究が引き続き行なわれていたが<sup>42),43)</sup>、わが国では未開発森林が比較的少なく、また施業自体も比較的集約化されてきているので、蓄積推定の精度向上が要求されるようになった。しかし、これに十分に応えるものは極めて少ない。そこで、航空写真の利用の方向として、森林調査の省力化のために利用する考え方がうちだされはじめた。このため、写真像の濃度計測による林型解析がはじめられ、コンピューターを用いた多変量解析法などがとりあげられている。1963年中島<sup>40)</sup>は国産濃度測定装置第1号を製作し、それを用いた研究の結果を報告しているほか、航空写真の濃度による樹種の判別、濃度波形による林分材積の推定などの研究が積極的に行なわれ、これらの成果をとりまとめたものとして、中島<sup>7)</sup>および長<sup>45)</sup>による報告が知られている。これらは、パングロ写真を利用して解析を行なったもので、樹種との関連においては、針葉樹人工林や同一樹種で構成されている広葉樹林ごとに、ラインプリンター方式による濃度波形グラフを作成し、これを用いて平均濃度を求め、樹種別の濃度特性を分析したものである。また、林分材積は、前記濃度波形グラフから求められる波形側断面積との関連によって推定するものであり、写真像の濃度を用いた林分構成要素の判別および判別の自動化をも意図していた。また、1965年以降、中島<sup>46)</sup>により、写真像の濃度の計測結果を、コンピューターで処理する手法が導入されてきた。一方、谷口<sup>47)</sup>による森林施業計画のための森林調査への航空写真の利用は、調査の省力化のためのものだけでなく、むしろ施業に利するものでなければならないことを主張した。菱沼・谷口<sup>6),48),49)</sup>は、北海道の天然林を対象として、航空写真による林分の分類を行ない、それぞれの林分ごとの標準地を地上に設け、その林木構成・更新状況および下層植生の状況を調査し、その取扱い基準を明らかにしている。この研究は、航空写真の利用に画期的な役割を果たしており、その後の諸調査<sup>50),51)</sup>に活用されつつあることを知る。

航空写真による天然林の解析に際し、その健全性の識別など、いわゆる質的構成要素の把握が可能になれば、航空写真の利用がより拡大発展することになる。以上のごとく、戦後期の

第3期は、前期に引き続き蓄積推定に関する判読手法の検討がなされたと同時に、その推定精度の向上が要求されたが、これには十分応えられないまま、単に省力化のための航空写真の利用にとどまったことを見のがしえない。さらに、航空写真からえられる諸情報を、コンピューターで処理する方法が導入され、情報処理が従来より容易に行なえるようになった。しかし、このなかにあつて、谷口ら<sup>6),48),49)</sup>が、北海道の天然林を対象として、地上調査を併用しつつ、航空写真を利用して、作業法の子察を行なうための研究をすすめてきたことは、航空写真による判読分野で、とかく忘れがちであった林分の健全性などの質的構成要素を知る必要性を刺激することになり、筆者の研究の動機となったことを、特筆しておかなければならない。

第4期(1972年以降);この期に入つても、引き続き写真像の濃度計測による蓄積推定や航空写真からの諸情報をコンピューターで処理する解析がすすめられている。一方、1970年代に入り、木材工業の原料供給という名のもとに、1957年以降行なわれてきた大面積の皆伐にもとづく人工林化は、天然林の乱伐・不成績造林地の拡大を促がし、洪水・土砂流出などによる諸災害の多発や貴重な自然の破壊をもたらしたという国民的批判が起きた。さらにまた、大気汚染などによる都市環境の破壊も問題視されるようになった。このため、あらためて森林の公益的機能が云々されるようになり、1972年国有林野事業の改善についての答申が出された。このような森林に対する認識の変化により、大量の木材生産を主たる目標としてきた従来の森林施業は、森林がもつ公益的機能を重視せざるをえなくなったのである。このことは、森林調査にも影響をおよぼし、量的把握のみならず、樹種や樹木の健全性などの質的構成要素の把握が重要となつてきた。しかし、大面積の森林を対象として、上記のごとき林分の質的構成要素を把握することは容易なことではなく、このため、航空写真によるそれらの要素の識別が、注目されるようになった。ここでまず注目されたのが、1959年頃から検討されていたリアルカラー写真および赤外線写真である。このうち、リアルカラー写真が森林調査に利用されるようになったのは、1967年からであるが、1970年までは、白黒写真がリアルカラー写真に置き換えられたにすぎず、実際に活用されるようになったのは、今期に入ってからである。また、赤外線写真は、植物の種類や健全性の違いに、パンクロ写真よりも敏感に反応し、それらの違いによる写真像の濃度差が、比較的大きいことや、写真撮影が天候に影響されることが少ないなどの利点がある。一方、フィルムの保存性がパンクロフィルムに比べて悪いこと、露出時間がパンクロフィルムの4倍も要することなどの欠点をもっていたため、赤外カラー写真やマルチスペクトル写真が利用されはじめた。このなかにあつて、高橋・谷口・菱沼ら<sup>50)</sup>は、林分構造とりわけ、樹種の識別に、赤外線写真が有効であることを実証し、その後における林分の質的要素に関する諸研究に刺激を与えたことは評価されてよい。1970年代に入ってから、わが国に赤外カラー写真やマルチスペクトル写真が導入され、その積極的利用がはかれるようになった。このことは1972年にアメリカが、地球資源技術衛星を打ち上げ、これからえられたマルチスペクトル写真やスキャナーによるデータを、他国にも貸与されはじめたことに起因する。赤外カラー

写真やマルチスペクトル写真が、従来の写真と異なるところは、地上物体の識別や判読を目的とするところにある。このうち、わが国で赤外カラー写真が、最初に計画的に使用されたのは、1971年に科学技術庁<sup>58)</sup>が、主として大気汚染に関連する都市環境調査においてである。この調査結果は、翌1972年に同庁資源調査会から報告された。一般に、市街地の大気汚染が進行すればするほど、その地域の街路樹や公園樹などの生育に影響を与え、樹葉の変色、異常な落葉や落枝などの現象を誘発することが知られている。上記の調査結果は、このような樹木の生理的異常現象と、赤外カラー写真上の色彩との関連性を分析し、それにもとづいて大気汚染の状況を間接的にとらえたものである。この手法は、赤外カラー写真を利用した樹種や樹木の健全性などの識別に活用されている<sup>54),55),56),57)</sup>。しかし、江森・安田<sup>18)</sup>らおよび菱沼・谷口<sup>13),14)</sup>による実験では、この種写真を利用して、樹木の健全性を十分把握しえないことを知ったが、このことは、本研究の進歩に重要な意義をもつもので、これについて、本章第1節で明らかにしている。また、マルチスペクトル写真の利用は、環境調査、農業および林業などの分野におけるものが大部分であるが、近年は海洋調査などにも利用されつつある。これらのうち、単木ごとの樹種や樹木の健全性の識別については、高橋<sup>9),58)</sup>、菱沼<sup>13),14)</sup>のほか多くの研究がなされている<sup>15),59),60),63)</sup>。しかし、林分の樹種識別については、高橋<sup>9)</sup>以外にその例をみないし、その健全性の識別については、菱沼ら<sup>62)</sup>、小野<sup>16),17)</sup>および日本林業技術協会<sup>63)</sup>によるもののみである。林分の健全性の識別については、菱沼の研究手法と、小野らのそれとは基本的に差異がある。その主なるものは、解析すべき林分の単位面積、健全性の評価方法、解析手法などにあるが、これらの詳細については、第4章～第6章で明らかにする。一方、1972年に、大金ら<sup>10)</sup>は、パンクロ写真を用い、デジタルカラー解析によって、人工林の地位判定、蓄積推定<sup>64)</sup>、さらに間伐計画への利用<sup>65)</sup>などを行なっている。板垣<sup>12)</sup>、谷口ら<sup>66)</sup>は、さらにこの手法を用いて、林相解析の可能性を検討しているが、渡辺<sup>11)</sup>による森林航測への活用をもふくめて、これらは写真濃度による識別の自動化の1方法として、特筆されるべきものである。このように、戦後期の第4期は、第3期から醸成されつつあった写真濃度による蓄積推定の手法が、引き続きすすめられたが、林分内容の質的な識別にまでは立ちいたらなかった。その後、自然環境の保全に関する国民的意識の高まりなどもあって、森林に対する認識の変化は、森林施業計画のための森林調査において、林分の質的構成の把握が次第に重要視されるにいたった。このため、とくに1970年代以降の航空写真による森林調査の分野でも、この質的要素識別の必要性が強調されるようになり、赤外線写真の利用からはじまり、赤外カラー写真、そしてマルチスペクトル写真の利用へと発展しつつあるのである。しかし、これらの写真による林分の質的解析の多くは、一部を除いて、人工林あるいは比較的単純な林相をもった林分を対象として行なわれているもので、複雑な構造をもつ天然林を対象とするこの種研究は、ようやく緒につきはじめたといつてよからう。

### 第3節 従来の研究における問題点

すでに本章第1節および第2節で述べたような、森林調査への航空写真の利用の歴史的経過を通じて、樹種・樹木の健全性、林分の樹種構成・健全性などの質的構成要素の識別に関する研究は、樹木の樹高・樹冠直径や平均林分高・樹冠占領面積および蓄積などの量的構成要素の判読に関するものに比べ、著しく立ちおくれている。とりわけ、樹木の健全性の識別に関するものは、戦前期の南樺太における虫害木や、多発する山火事による枯損木や、戦後期の第2期における15号台風による被害発生などを契機に、検討を要する課題であった。しかし、戦前期では敗戦後のわが国における自主的飛行の禁止、戦後期では木材の大量生産を重視した林野行政に阻まれ、実際に検討されることもなく、戦後期の第3期に入った。この期においても、その後半になって、菱沼・谷口ら<sup>6),48),49)</sup>が、天然林を対象とする森林調査への航空写真の利用を、作業法の子察にまで発展させるようになり、ようやく健全性の識別の必要性が認識されはじめた。その後、第4期に入って、急速な土地利用開発にともなう自然破壊や都市環境の汚染、木材の大量生産にともなう森林の荒廃などが明らかになり、森林施業計画において、森林がもつ公益的機能がにわかに重視されるようになった。このため、森林調査において樹木および林分の健全性の把握が必要となった。そこで、大面積の森林を対象とするこの種航空写真の利用が、注目されるようになり、このための研究が、1973年以降ようやく本格化するにいたった。この研究は、当初赤外カラー写真によるものであったが、1974年以降はマルチスペクトル写真にかわり、それが活発に行なわれ、現在にいたっている。

赤外カラー写真は、スペクトル領域 $0.4\sim 0.9\mu$ の範囲内で、地上の物体がもつスペクトル反射エネルギーを、一括してとらえるものである。しかも、樹種やその健全性に関連して、最も敏感に反応する近赤外部( $0.7\sim 0.9\mu$ )での濃度を、赤色に置きかえて表現され、生育状況が健全な状態にあるものほど、より強く赤色をおびる。この写真像の色彩的特性により、健全性を識別することができるといわれている。しかし、江森・安田<sup>18)</sup>および筆者ら<sup>14)</sup>の実験によれば、赤外カラー写真がこの種識別に最も効果的なものであるとはいえないことを知った。

マルチスペクトル写真は、 $0.4\sim 0.9\mu$ のスペクトル領域を、いくつかのスペクトル領域に分割し、それらの領域ごとに地上の物体をとらえるものである。本研究においてとり扱っているマルチスペクトル写真は、 $0.4\sim 0.5\mu$ 、 $0.5\sim 0.6\mu$ 、 $0.6\sim 0.7\mu$ 、 $0.7\mu$ 以上の4つのスペクトル領域に分割されて撮影されるものである。これらの4つのスペクトル領域ごとの写真のうち、いずれかの2~3のスペクトル領域別の写真を用いて、加色ビューワーにより合成写真を作り、これらの組合わせ写真のなかから、樹木および林分の健全性の識別に最も適した組合わせ写真を作成し、解析することができる。このことが、赤外カラー写真にかぎらず、パングロ写真・赤外線写真およびリアルカラー写真などと異なる最も優れた利点である。ただし、この有利性を活かすためには、樹木および林分の健全性に関連して、上記の4スペクトル領域に分割して撮

影された写真像の濃度特性を知っておくことが重要である。しかし、このために、限られた環境のなかで生育している都市の街路樹や公園樹についての実験結果を、ただちに多様な土地条件のもとで、複雑な構造をもつ林分の健全性の識別のために、適用することには問題がある。

また、それぞれのスペクトル領域に分割されて撮影された写真ごとの濃度特性を知るためには、すべての写真が共通してもっている光学的性質、すなわち周辺光量の違いや、連続して撮影された写真ごとにもつ総体的濃度の違いなどによるノイズを、できるだけ除去することが前提条件である。筆者は、これらのノイズを除去しつつこの研究をすすめている。

つぎに、解析すべき林分の単位面積の大きさを決めるにあたって、一般にそれが大きくなればなるほど、その林分にくまられる不健全木の占める割合が低くなる。このため、林分の濃度への影響が少なくなることが考えられる。そこで筆者は、解析すべき林分の単位面積と、そこにくまられる不健全木の割合との関連を知るための実験を行ない、単位面積を 0.25 ha とし、この研究をすすめてきた。

さらに、写真像の濃度は、撮影時の太陽の位置に関連して、林分ごとの斜面方位・傾斜度および標高などの地形的要素によって大きく影響をうける。このため、写真像の濃度による林分の諸要素の識別にあたって、あらかじめ林分ごとに地帯区分を行ない、これにもとづいて解析することが必要である。

航空写真による林分の質的要素にかかわる識別には、健全性のみならず、樹種構成も重要な要素の 1 つであり、高橋<sup>9)</sup>は、この識別に関するすぐれた研究を行なっている。しかし、この研究の主たる対象は、針葉樹人工林や同一樹種で構成されている広葉樹一斉林であり、天然林を構成する樹種の識別までにはいたっていない。森林調査への航空写真の利用は、広大な森林とりわけ天然林を対象とすることに重要な意義をもっている。したがって、筆者は林分の健全性の識別について、樹木におけるこの種識別に関する基礎的研究の結果を、林分を対象とする応用的なものに敷衍する必要性を認識し、この研究をすすめてきた。

#### 第 4 章 健全性の概念

すべての生物は、その発生から死にいたるまでの過程をへながら生長しつづける。樹木は、地上に落下した種子から発根・発芽などの分化がすすみ、樹木としての機能をもった成体が形成され、その後は生物学的あるいは物理的な諸々の阻害要因に耐えながら生育しつづけ、遂には枯死する。

このような樹木にかかわる生命現象の 1 側面をとらえ、近年『樹木の活力』という言葉が使われはじめている。このことは、主として自然や都市環境の汚染の程度を知るため指標として、にわかに 1970 年 (昭和 45 年) 頃から重要視されるにいたった。とくに 1972 年 (昭和 47 年)、科学技術庁資源調査会<sup>53)</sup>が資源利用と環境保全の調和に関する勧告を行なうにあたり、表-1 に示すごとく樹形・樹冠の形状と大きさ・葉量および葉色の状態などをよりどころにし

て、いわゆる『樹木の活力』を評価し、これを媒介として大気汚染の程度を把握しようとしたが、これが今日なお『活力』の内容を表わす具体的根拠になっている。その後、これが航空写真による環境調査や森林調査などの分野で、グランド・トルースを示すための手法として活用されている。

生態学における活力は、生物の生活・生殖の度合を意味する。生物学では生活力がほぼこれに該当し、生体の活動力とか強壯性などを表わすが、抽象的な概念にすぎない。Braun Blanquet<sup>67)</sup>は、群落構成種に関する分析手法の1つとして、植物が群落内で発芽・生長・開

表-1 樹木の活力評価基準 (科学技術庁資源調査会による)

測定項目	評価基準			
	1	2	3	4
樹勢	旺盛な生育状態を示し、被害が全くみられない	幾分被害の影響を受けているがあまり目立たない	異常が明らかに認められる	生育状態が劣悪で回復の見込みがない
樹形	自然形を保っている	若干の乱れはあるが、自然樹形に近い	自然樹形の崩壊がかなり進んでいる	自然樹形が完全に崩壊され、奇形化している
枝の伸長量	正常	幾分少ないが、それ程目立たない	枝は短小となり細かい	枝は極度に短小、しょうが状の節間がある
梢端の枯損	なし	少しあるが、あまり目立たない	かなり多い	著しく多い
枝葉の密度	正常、枝および葉の密度のバランスがとれている	普通、1に比してやや劣る	やや疎	枯枝が多く、葉の発生が少ない。密度が著しく疎
葉形	正常	少し歪がある	変形が中程度	変形が著しい
葉の大きさ	正常	幾分小さい	中程度に小さい	著しく小さい
葉色	正常	やや異常	かなり異常	著しく異常
ネクロシス	なし	わずかにある	かなり多い	著しく多い
萌芽期	普通	やや遅い	著しく遅い	
落葉状況	春または秋に正常な落葉をする(年1回)	正常なものに比してやや早い(年1回)	不時落葉する(年2回)	不時落葉する(年3回以上)
紅(黄)葉状況	正常	幾分色が悪い	葉が部分的に紅(黄)するが、色が悪い	紅(黄)葉せず、汚れた状態で落葉する
開花状況	良好	幾分少ない	わずかに咲く	咲かない

花ならびに結実する過程、すなわち生育の過程を、どれだけ正常に経過できるかの程度を活力度としている。これによれば、最も活力の度の高いものは、生育の過程を正常に経過し、よく繁茂する植物、つぎにあまり繁茂しないが、繁殖できる植物、さらに生育は正常といえないが繁殖する植物の順となり、最も活力度の低いものは、偶然に発芽し、繁殖力のない植物である。しかし、この基準は、いささか曖昧であるといわなければならない。このように、活力・生活力あるいは活力度など、生態学においても、また生物学においても、それらの定義は甚だ抽象的で不明確である。しかも、樹木は複雑な立地条件のもとで生育している。したがって筆者は、森林測定学の立場から、活力という表現は不用意に使用すべきでないことを主張する。

事実、これまでに生物学あるいは生態学の分野で、活力調査として報告されている事例はほとんどない。また、航空写真を利用した森林調査や環境調査の分野において、この種研究を積極的にすすめているアメリカやカナダにおいても、*damage*<sup>68)</sup>、*disease*<sup>69)</sup>の判読または判別という表現が用いられている。また、大気汚染など明らかにその要因がわかっている場合には、*stress*<sup>70)</sup>という表現がみられるが、活力あるいは生活力の判読または識別に相当するものではない。

科学技術庁<sup>53)</sup>、林野庁<sup>16),17)</sup>、および日本林業技術協会<sup>63)</sup>などという『樹木の活力』とは、前掲表-1にある諸項目の測定結果からえられた樹木の生育状況を表わすものにすぎないと筆者は考える。したがって、樹木が外見上正常な生育状況にあるか否か、すなわち健全木であるか否かを、それを表わす諸項目の調査結果にもとづく総合評価により、判断することにとどめるべきである。

## 第5章 樹木の健全性

### 第1節 健全性の評価方法

健全性の調査は、地上調査によっている。そして、この評価方法は、第1に十分に客観性をもったものでなければならないし、第2に、林業技術者が容易に判断しうる基準であることがのぞましい。

航空写真を用いて、樹木の健全性を把握するためには、これと写真の樹木像の濃度との関連からはじめなければならない。一方、森林に生育する樹木は、樹種・樹齢・胸高直径など複雑であり、しかも多様な立地条件のもとで生育している。このため、樹木の健全性を知るためには、一見より多くの生育関連因子を測定・観察する必要があるようにみえる。しかし、樹木の生育状況を、航空写真を用いて把握しようとする場合、直接的には、樹木の樹冠上部の形状や大きさ、および濃度や色彩によらざるをえない。したがって、これらの諸要素に直接関連をもつと考えられる項目を調査して、評価することが重要である。このような観点からすれば、前章で述べたとき、科学技術庁<sup>53)</sup>や林野庁<sup>16),17)</sup>で適用している調査項目および評価基準には、いささか問題がある。まず、そこであげられている13項目のうち、樹冠の形状や大きさ

に直接関連をもつものとして、樹形および枝の伸長量があげられる。その他の項目は、樹冠の濃度や色彩に直接関連をもつ要素として考えてよい。しかし、これのうち、樹形や枝の伸長量の評価基準をみると、樹形については、それが自然形を呈するか否かの判断にかかわるものである。森林に生育する樹木は、それぞれ樹種や樹齢が多様である。したがって、上記のごとき基準をただちに森林の樹木に適用することは問題である。このことは、その他の項目についても同様である。また、評価基準の区分にかかわって、評価対象木がそのいずれに属するかを判断するためには、高度の知識を有する専門家によらざるをえない。さらに、数多くの測定および観察項目を調査しても、その処理が煩雑になるだけで、特段の効果は期待できない。

ここで筆者は、従来から調査項目を航空写真の濃度に直接影響を与えらると思われる以下の4要素につき、それぞれ水準を設けて評価している。

1. 樹葉の変色
2. 梢頭の枯損
3. 樹冠部の枯枝
4. 葉量

これらの4要素について、樹冠の上部に、明らかに異常の認められる要素が1つでもあれば、その樹木を不健全木として評価し、すべてに異常が認められないものを、健全木とした。また、葉量については、他の樹木に比して、きわめて少ないものを不健全木としている。

## 第2節 樹木の健全性とスペクトル反射

主として航空写真の濃度により、樹木の健全性を把握しようとする場合、濃度と健全性との関連を知ることが重要である。

航空写真の濃淡は、地上のすべての物体からの太陽光のスペクトル反射エネルギーが、フィルムの乳剤面に作用し、それによる化学的反応の結果としてもたらされる<sup>71),72)</sup>。太陽光のスペクトル反射エネルギーは、それぞれ固有の性質をもっていることが知られている<sup>71),73),74),75),76)</sup>。このような、スペクトル反射特性は、植物についても、多くの研究者によって分析されている。一般に、スペクトル反射エネルギーは、スペクトル反射率におきかえて測定されるもので、植物の葉や花卉につき、その正常なものや各種の処理をほどこしたものなどについて分析が行なわれている。ワタの葉やモクレンおよびバラの花卉による D. M. GATES ら<sup>77)</sup>、同じく H. W. GAUSMANN<sup>78)</sup> などの実験が知られている。И. А. Шульгин<sup>79)</sup> は、A. SEYBOLD (1942年) から前記 D. M. GATES (1965年) にいたる諸外国の研究者らによる成果を、要領よく取りまとめている。これまでのわが国においては、この種の組織的な研究はみられていないが、近年にいたり、これがリモートセンシングの基礎的研究分野の1つとして、急速に重要視されるようになり、その研究もようやく展開をみせはじめてきた。このうち、植物の葉を用いた実験には、高畑<sup>80)</sup> および江森・安田<sup>81)</sup> によるものがある。これら一連の実験結果を、波長帯別のスペクトル反射

率で示すと、図-1のような傾向が認められる。これは、ワタ・トマト・トウモロコシおよびミカンの緑葉についての実験例である。これによれば、可視部の0.55 $\mu$ 付近に、さらに近赤外部の0.7~1.4 $\mu$ および1.5~1.9 $\mu$ 付近に、そしてまた、2.25 $\mu$ の赤外部にそれぞれ大きな反射が認められる。同時にまた、上記4種類の緑葉につき、その種類ごとに反応の差が認められる。このことは、植物の種類のみならず、たとえ同じ種類であっても、色素量、含水量および測定の子節などにより、かなりの変動があることが、知られている<sup>77),78),79),81),82),83),84)</sup>。

つぎに、樹木の波長別スペクトル反射について、P. A. MURTH<sup>68)</sup>は図-2のごとく、針葉樹、広葉樹ともに、そのピークが現われる波長は、ほぼ同じであることを示している。

以上のごとく、植物の波長別スペクトル反射特性は、植物の種類や生育条件によって異なることがわかる。

### 第3節 樹木の健全性とマルチスペクトル写真

植物のスペクトル反射特性について、その一般的特徴は、すでに前節で述べたとおりである。わが国では樹木を対象としたこの種研究は、きわめて少ない。このなかにおいて1973年8月に行なった江森・安田<sup>81)</sup>および菱沼・谷口<sup>14)</sup>の苗木による実験は、樹木のスペクトル反射率とマルチスペクトル写真との関連を知るうえで、特筆すべきものである。

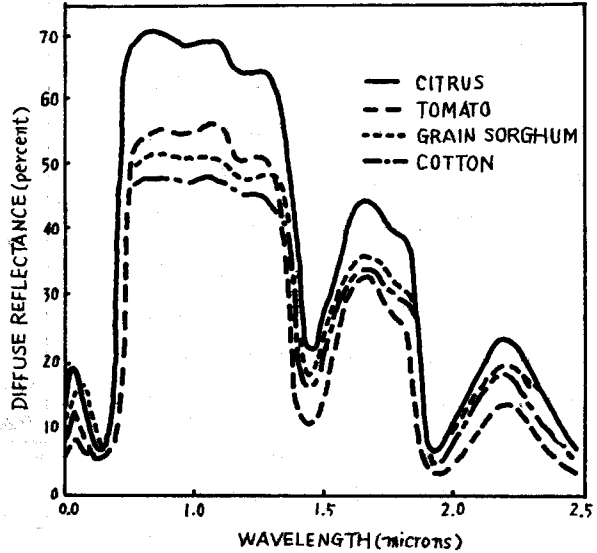


図-1 ワタ・トウモロコシ・トマトおよびミカンの葉の透過率 (Committee of Remote Sensing for Agricultural Purposes による)

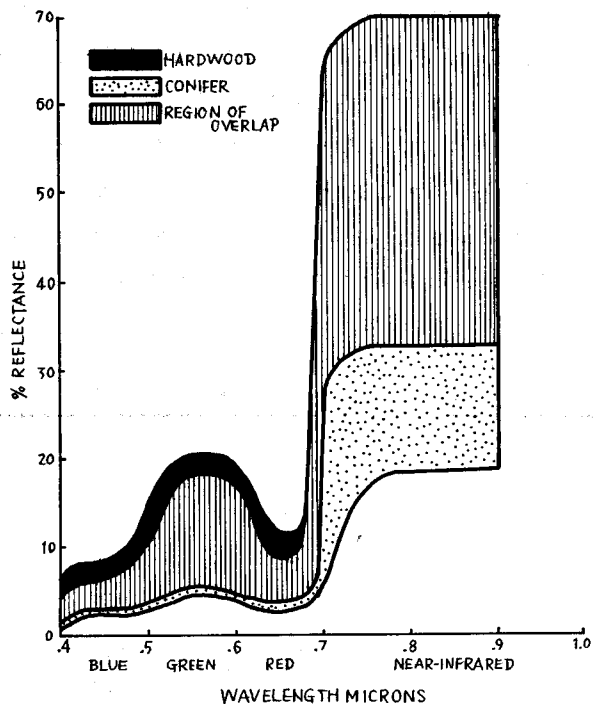


図-2 樹木の反射率 (P. A. MURTHA による)

この研究において、江森・安田は、スペクトル反射率、菱沼・谷口は、マルチスペクトル写真の濃度を、それぞれ測定し分析を行なった。この測定の対象は、6年生のアカエゾマツ健全苗、6年生および3年生のトドマツ健全苗と枯死苗の5種類で、これらはそれぞれごとに、苗冠が密着するように方形に配列し、地上10mの檜の上から、撮影・測定できるように設計された。この研究結果のうち、スペクトル反射率は、図-3のとおりである。これによれば6年生のアカエゾマツおよびトドマツの健全苗について、全体として後者が前者よりも高く、この関係は $0.7\mu$ 以上の近赤外部で、よりこれが顕著である。また、トドマツ

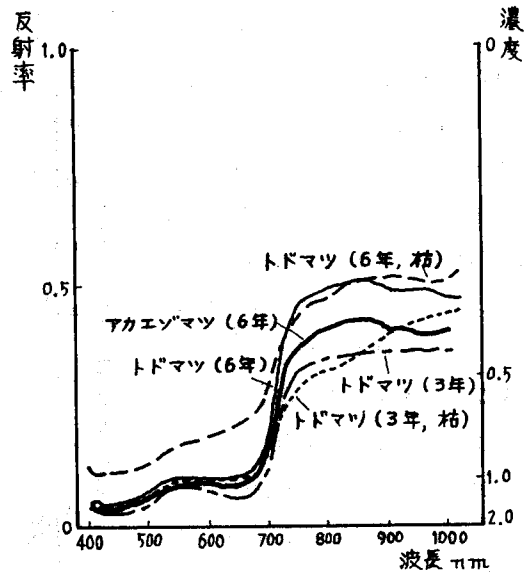


図-3 苗木の反射率 (江森・安田による)

の6年生および3年生の健全苗では、全体として前者の反射率が後者のそれよりも高く、この場合も近赤外部で、よりこれが顕著である。さらに、トドマツの健全苗と枯死苗の反射率は、 $0.4\sim 0.7\mu$ の可視部および $0.86\mu$ 以上の近赤外部では、6年生・3年生のいずれも、枯死苗の反射率が健全苗のそれよりも高いが、 $0.7\sim 0.8\mu$ 付近では、この関係が逆転している。しかし、この理由は、いまのところ不明である。

菱沼・谷口は、江森・安田と同一の供試苗について、地上用マルチスペクトルカメラを用いて、B・G・RおよびIRのバンド別写真を撮影し、供試苗ごとに、その平均濃度を測定した。これによると、表-2のごとく、アカエゾマツおよびトドマツの6年生の健全苗については、Bバンドを除いたすべてのバンド別写真で、トドマツの濃度がアカエゾマツのそれよりも低く、Bバンドではアカエゾマツの方が低い。また、トドマツの6年生および3年生の健全苗

表-2 生育状況別バンド別平均濃度

樹種	苗齢	生育状況	バンド別平均濃度			
			B	G	R	IR
アカエゾマツ	6	健全	1.24	0.87	0.89	0.21
トドマツ	6	健全	1.28	0.77	0.85	0.14
	6	枯死	0.90	0.74	0.29	0.36
	3	健全	1.15	0.84	0.90	0.28
	3	枯死	0.84	0.68	0.34	0.38

については、Bバンドを除いたすべてのバンド別写真で、3年生の濃度が6年生のそれよりも高い。さらに、トドマツの健全苗と枯死苗の濃度は、6年生および3年生のいずれの場合も、B・G・Rのそれぞれのバンド別写真で、健全苗の濃度が、枯死苗のそれよりも高く、IRバンドでは枯死苗の方が高い。これらの結果を、さきの江森・安田のそれと対比してみると、総体的にスペクトル反射率が高いものは、バンド別濃度も高いことが立証された。また、樹種・年齢および健全性の相違が、バンド別写真の濃度特性としてとらえうるということが認められた。

この研究は、苗木によるもので、樹木とはその生育条件が異なるとはいえ、実験の設定方法からみれば、ある限られた条件のなかでの模型実験といえる。しかし、この研究は、樹木の健全性を知るために、マルチスペクトル写真を用いることが、有効な手段となりうることを示唆している。

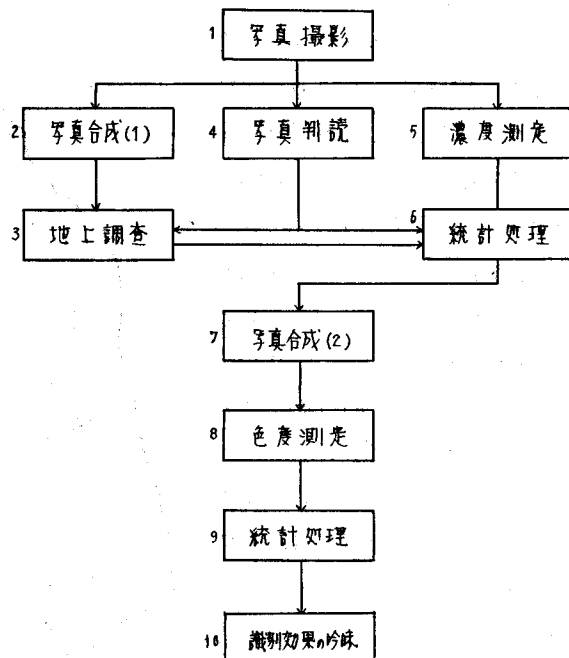
このほか、樹木を対象とする、わが国のこの種研究として、高畑<sup>80)</sup>および渡辺ら<sup>15)</sup>の研究がある。しかし、前者は、樹木の単葉についての、スペクトル反射率とパンクロ写真の濃度の関連を示したものにすぎないし、後者は、マルチスペクトル写真の濃度、とくにバンド別写真の濃度との関連をとらえるまでにはいたっていない。

ここで筆者は、江森・安田および菱沼・谷口らによる実験結果が、本研究をすすめるために、マルチスペクトル写真を使用する要因になったことを、強調しておきたい。

#### 第4節 研究の手順

現在わが国におけるマルチスペクトル写真の利用は、地質・植生・海洋および環境調査などの諸分野でみとめられる。しかし、その多くは地上の物体と写真像との関連を十分に把握し、これにもとづく利用がすすめられているとは限らない。このことは、森林調査への利用の分野においても例外でなく、とくに樹木や林分の健全性の識別に関しては、いまだそのその方法すら確立されていない。したがって、この種研究をすすめるためには、その手順と内容が何よりも重要な課題となる。

写真像の濃度を媒介として樹木



図—4 研究の手順

や林分の健全性を識別しようとする場合、およそつぎのごとき諸要件による濃度への影響を吟味することなしに、かかる研究をすすめない。すなわち

1. 写真像の濃度がもつ光学的要因

周辺光量の違い、写真の現像・焼付・引伸しにかかわる諸条件

2. 樹木および林分の位置

標高・斜面方位・傾斜度

3. 樹種・樹齢および林分の構成

4. 下層植生

などである。

そこで筆者は、これらの諸条件と濃度との関連性を明らかにし、濃度条件を樹木および林分の健全性のみ収斂させるための処理をへつつ、まず植栽木による樹木の健全性識別のための研究を、図-4のごとき手順にしたがってすすめた。

1. 写真撮影

マルチスペクトル・イメージ方式により、1974年7月12日および18日の両日にわたり、札幌営林局定山溪営林署管内石山事業区1204～1209林班に位置する人工林(図-5参照)を対象に、スペクトル領域をBバンド(0.4～0.5 $\mu$ )、Gバンド0.5～0.6 $\mu$ )、Rバンド(0.6～0.7 $\mu$ )およびIRバンド(0.7～0.9 $\mu$ )に分割して撮影した(図版I、II)。

焦点距離100mmの国際マルチスペクトルカメラ(KMC-II)を使用し、そのフィルムサイズは6cm×6cm、写真の原縮尺は1/5,000である。

この撮影に先立ち3.6m×3.6m

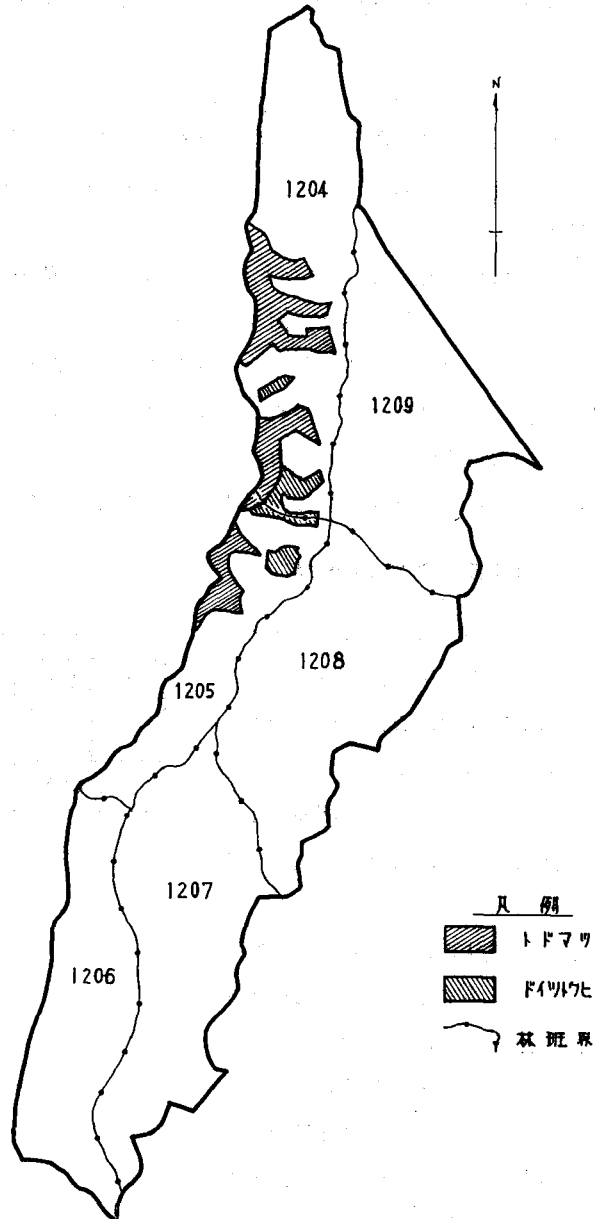


図-5 試験地位置

の反射光量既知のグレースケール3枚(黒色・灰色および白色)が地上に設置され、写真濃度測定値の補正を図りうるようにした。また、焼付にあたっては、同一の箇所にかかわるB, G, RおよびIRバンド写真をワンセットとして、それに標準濃度スケールが付されている。

この研究の対象となったドイツウヒおよびトドマツ人工林は、図-5に示しているごとく、その前者は1204林班は小班および1205林班ろ小班、後者は1204林班ろ小班および1205林班は小班に、それぞれ位置している。これらはいずれも北向・東向および南向の中傾斜地に成林し、写真撮影時のドイツウヒ人工林は46年生でha当り220 m<sup>3</sup>、トドマツ人工林は47年生でha当り230 m<sup>3</sup>であった。

2. 写真合成 (1)

従来の諸研究によれば<sup>(18), (53), (54), (55), (56)</sup>、パングロ写真、赤外白黒写真、リアルカラー写真および赤外カラー写真を用い、虫害・病害などの被害木を識別しようとする場合、これらの写真のなかで最も効果的なものは、赤外カラー写真であるとされている。そこで筆者は、地上調査に先立って、キャノン・マルチスペクトルビューワー (Canon MSV-300) を用い、赤外カラータイプの写真を合成し、これを供試木選定の参考に供した。

ここで使用したマル・チスペクトルビューワーは、3種類のバンド別ポジフィルムに、青・緑および赤の光を透過させ、同一のスクリーンに結像させる機能をもった装置である。このスクリーンの大きさは30 cm×30 cmで、投影倍率は5倍である。さらに、このスクリーン上の画像を地上用カメラで撮影し、これを地上調査に供した。

3. 地上調査

従来からの筆者らの研究によつて<sup>(13), (14), (60), (66)</sup>、B, G, RおよびIRバンドの写真のうち、比較的写真像が鮮明で肉眼視に適するものは、Rバンド写真であることが知られている。そこで、このRバンド写真の立体視により、また赤外カラータイプの合成写真の色彩を参考にして、供試木を正確にRバンド写真上に刺針しつつ地上調査を行なった。樹木の健全性にかかわる調査項目は表-3の

表-3 調査項目

調査項目	区 分		
	樹葉の変色	な し	あ り
全体又は上部			下 部
梢頭の枯損	な し	あ り	
		著 し い	少 な い
樹冠部の枯枝の位置	な し	あ り	
		上 部	下 部
葉 量	多い又は普通	少 な い	
胸高直径	cm		
樹 高	m		

表-4 生育状況別供試木本数

生育状況	樹 種			
	ドイツウヒ		トドマツ	
	本 数	百分率 (%)	本 数	百分率 (%)
健全木	202	63.3	185	75.2
不健全木	117	36.7	61	24.8
計	319	100.0	246	100.0

とおりである。

ここで調査された供試木の本数は、表-4に示してあるごとく、ドイツウヒ 319本、トドマツ 246本である。この結果は、本章第1節に述べてある健全性の評価基準によっている。

4. 写真判読

写真判読は、立体視によるものが基本であり、それには3つの重要な役割が課されている。

その第1は、供試木の位置を、斜面方位によって区分することである。山田<sup>85)</sup>によれば、光の強さは斜面の入射角の正弦に比例するという原理から、宝川試験地における各斜面方位ごとの受光量の違いを、春分正午時にうける太陽光を1.00とする受光係数によって示している(図-6)。これによると、傾斜度が同じであっても受光係数が斜面方位によって異なることがわかる。

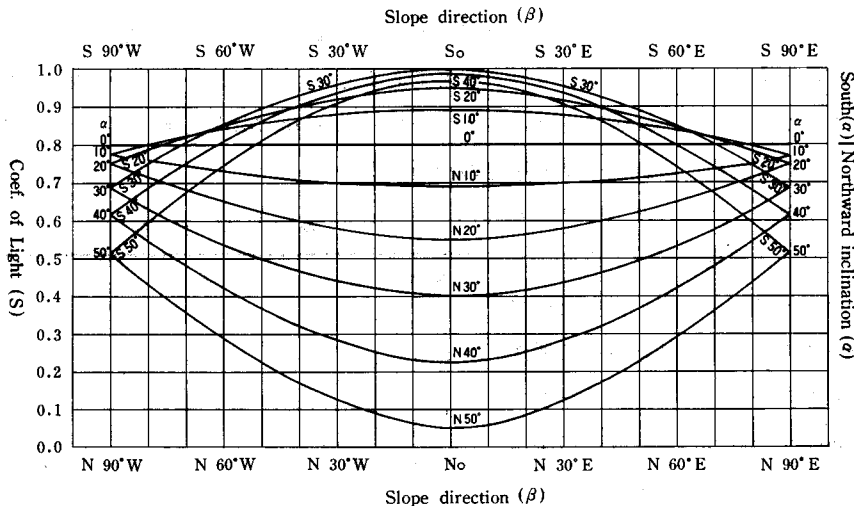


図-6 宝川試験地任意傾斜, 任意方位地点の受光係数 (山田昌一による)

また、筆者らが、1960年7月9日13時に撮影されたパンクロ写真を用い、傾斜度26~39度の斜面に生育するササ地を対象とし、その濃度を測定した結果によれば、斜面方位別(北向・東向・南向および西向斜面)、斜面位置別(斜面上部・中部および下部)の平均濃度は、表-5に示すとおりである。これによると、ササ

表-5 ササ地の方位別濃度

斜面方位	斜面の位置		
	斜面上部	斜面中部	斜面下部
北 向	0.51	0.68	0.66
東 向	0.40	0.41	0.48
南 向	0.45	0.45	0.58
西 向	0.53	0.50	0.61

地の濃度は、いずれの斜面位置においても、総じて東向斜面、南向斜面、北向斜面の順で暗さを増していることが認められた。つぎに、長<sup>8)</sup>は、太陽光線に対する向日面と背日面の色調度を測定し、これによりt検定を行ない、向日面の色調度と背日面のそれとの間に有意な差があることを実証している。さらに、中島<sup>7)</sup>による模型実験で、斜面の方位角θと濃度Dとの間に

$$D = 23.746 \cos \theta + 289.368$$

の関係が成立するとしている。

これらの結果はいずれも、斜面方位により写真像の濃度が相対的に異なることを示すものであり、これは樹木の濃度にも影響を及ぼすものと考えてよい。したがって、供試木をその位置によって斜面方位ごとに区分することは、濃度解析を行なうために必要な前提条件となる。

第2に、人工林内の樹木の濃度は、それが位置する地形要素のみならず、隣接木の陰影などによっても影響を受ける。このためこの研究においては、立体視により、樹冠のすべての部分が太陽光に面している樹木のみを選定して供試木とした。

第3には、樹木の健全性に直接関連をもつと考えられる樹冠断面積を測定することである。人工林では、太陽光に面する陽樹冠が大きいほど樹木の生長が旺盛で、それが貧弱なものほど被圧された状態にある<sup>87)</sup>。したがって、このような陽樹冠、すなわち写真上にうつし込まれた樹冠の大きさは、樹木の健全性を把握するための重要な要素である。このため、全供試木について、それらの樹冠を写真で測定し、写真倍率を乗じて樹冠断面積を算出した。

### 5. 濃度測定

濃度測定に供した写真は、ドイツトウビではコース1のナンバー2, 5~8の5枚で、トドマツでは同じくコース1のナンバー1, 4, 5, 7~11の8枚である。

これらの供試木の濃度は、自動色彩計 Quick Color Eye (ACM-4) を用い、バンド別密着

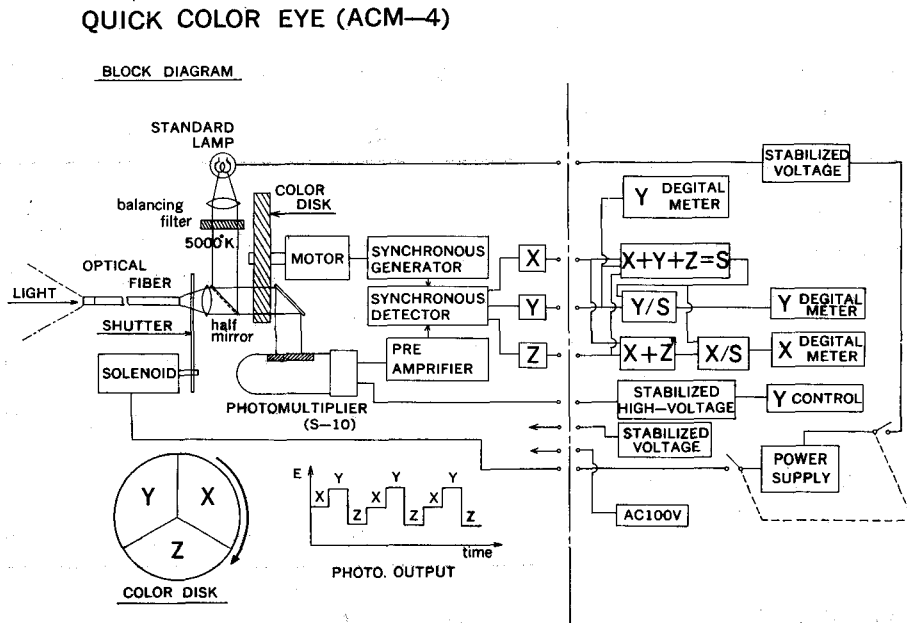


図-7 自動色彩計の構造

ポジフィルムごとに、供試木の位置を確認しつつ測定した。この測定機は、フィルム上の画像の光の透過率をデジタル表示できるようになっている。これは測定台、オプテカルファイバーおよび電源指示部からなり、さらに測定台は光源部、資料台および顕微鏡で構成されている。これらの構造の概略は、図-7に示されている。電源指示部のメーターに、光の透過率  $Y$  と CIE 1931 色度図の座標値  $x, y$  が直接表示される。また、フィルムを資料台に定置して測定できるだけでなく、オプテカルファイバーにより、測定することができる。

ここでは、フィルムを資料台に定置して測定している。この透過率の測定にあたり、ポジフィルムの作成の際に同時に焼き込まれた標準濃度スケールの最大透過率を1とし、供試木の透過率測定値から写真濃度を次式により変換した。

$$D = \log \frac{1}{T} \quad D; \text{写真濃度} \quad T; \text{透過率}$$

測定口径は 0.25 mm で、これは地上での直径 1.25 m に相当するが、これは供試木の最小樹冠直径が 1.30 m であることを知って口径調整を行なったものである。

標準濃度スケールは、B, G, R および IR バンド写真ごとに、ナンバー 1~4, 5~8, 9~12 の4枚ずつの写真をワンセットとして焼き込まれ、計3セットの組写真が作成された。したがって、これらのセットごとにふくまれる4枚の写真は、いずれも同じ濃度条件をもっている。しかし、セットごとの濃度条件が異なるので、この条件を同一にするための補正が必要である。このため、標準濃度スケールに付されている12段階の色調板の濃度を測定し、これを用いて各セットごとに濃度の補正を行なった。すなわち、3セットの組写真のうち、地上に設置されたグレースケールが撮影されているセット(写真ナンバー5~8)をベースとし、このセットに付されている標準濃度スケールの段階別濃度測定値を、他のセットのスケールのそれに対応させ、標準濃度スケールごとの関連を1次式で表わした。この1次濃度補正式は、表-6に示してある。これらの各数式の適合性を相関係数によってみるといずれも0.99であり、これらの数式を用いて、すべてのスケールを同一の濃度条件に補正できることが認められた。そして、このことはまた、この数式を用いて、各バンド別写真の供試木の濃度条件を同一にすることができる。

6. 濃度による判別

樹木の濃度は、その健全性に関連

表-6 濃度補正式一覧

バンド別	補正式	相関係数
B	$D_{b2} = -0.0213 + 0.9805 D_{b3}$	0.99
	$D_{b2} = 0.0157 + 1.1690 D_{b1}$	0.99
G	$D_{g2} = 0.0093 + 1.0060 D_{g3}$	0.99
	$D_{g2} = 0.0091 + 1.0101 D_{g1}$	0.99
R	$D_{r2} = 0.0295 + 1.1603 D_{r3}$	0.99
	$D_{r2} = 0.0117 + 1.0570 D_{r1}$	0.99
IR	$D_{r'2} = 1.0309 D_{r'3}$	0.99
	$D_{r'2} = -0.0108 + 1.0252 D_{r'1}$	0.99

註)  $D_{b1}, D_{g1}, D_{r1}, D_{r'1}$ ; 写真ナンバー1~4の濃度  
 $D_{b2}, D_{g2}, D_{r2}, D_{r'2}$ ; 写真ナンバー5~8の濃度  
 $D_{b3}, D_{g3}, D_{r3}, D_{r'3}$ ; 写真ナンバー9~12の濃度

して、バンド別写真ごとに異なった特性をもっている。この特性にもとづき、バンド別写真の組み合わせによる相乗的効果を予測し、判別分析法を用いて、健全性の判別に最も適したバンド別写真の組み合わせを選択しようとするものである。

この判別分析法は、与えられている多数のデータが、あらかじめ設定されているいくつかのグループにおいて、いずれのグループに属するかを判別する方法である。この場合、データが数量的なもので与えられ、グループが質的なものであるとき、有効な方法であるとされている<sup>(88),(89)</sup>。したがって、バンド別濃度データが、質的要素としての樹木の健全性の各グループのいずれに属するかを判別する場合、この方法が適用される。

判別分析には、一般に線型判別関数がよく使われる。この研究では、これを適用することとし、この手法が組み込まれているコンピューター・プログラム・システム——SPSS (Statistical Pacage for the Social Sciences)——の多重判別分析 (Discriminant) サブプログラムを用いて判別した。このプログラムは、変数群  $x_1, x_2, \dots, x_n$  を用いて、 $A, B, \dots$  の  $k$  箇のグループのいずれに属するかを判定する一方法で、与えられた変数値の1次結合

$$\hat{q} = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n$$

を、線型判別関数と呼び、 $b_1, b_2, \dots, b_n$  を判別係数としている。この判別係数を、現実のグループごとの  $\hat{q}$  の平均値の差が最大になるように、いいかえれば、相関比が最大になるように決定し、このときの  $\hat{q}$  にもとづいて、判別の適合度すなわち判別率が算出されるシステムをもったプログラムである。この研究では、健全性の2分類に関する判別を行なうため、単バンドごと、およびバンド別写真の組合わせごとに、1箇の線型判別関数が作成され、これによって判別率が算出される。この判別率は、現実の各グループに属する樹木本数と、濃度データを用いて判別された各グループごとの本数との比によって表わされる。

## 7. 写真合成 (2)

判別分析の結果えられたバンド別写真の組合せによる判別率は、統計的処理により導き出された論理的なものであるため、実際的にはバンド別組合せ写真を合成し、これを用いて判別率を検証することが必要である。しかも、この判別率は、バンド別写真ごとの濃度特性の相乗的効果によって与えられる。したがって、合成写真は、このような効果を分析しうるタイプのものでなければならない。

このため、この研究では、マルチスペクトル・ビューワーを用いカラー写真を合成した。この合成カラー写真は、バンド別写真ごとに異なった色光を透過させ合成されるから、それぞれのバンド別写真がもつ濃度特性は、与えられた色光の濃度によって表現される。したがって合成写真の色彩は、バンド別写真がもつ濃度特性を総合的に表現しているものと考えてよい。

マルチスペクトル・ビューワーを用いてカラー写真を合成する場合、バンド別の組合わせと、それらを透過させる色光およびその光量によって、合成カラー写真は多様になる。したがって、バンド別組合わせの効果を比較するためには、一定の基準を設けることが必要である。

この研究では、高橋<sup>9)</sup>の手法によって合成を行なった。ここで、3つのバンド別写真による合成に際しては、マルチスペクトル・ビューワーのスクリーン上で、地上に設置されたグレースケールの白色板が白色になるように、3つの色光の光量を調節している。ただし、IRバンド写真がふくまれる組み合わせにおいては、緑葉植物の赤外部の反射が可視部のそれよりもとくに高いため、標準板を白色にすると、IRバンド写真を透過させた色光が強調され、他の色光による変化が把握しがたくなる。このため、IRバンド写真を透過させる色光の光量を、マルチスペクトル・ビューワーの光量調節装置の紋りを3段階紋り込むことによって、調整し合成した。また、2つのバンド別写真の合成にあつては、ビューワーにバンド別写真を挿入せず、3色光を透過させて、スクリーンが白色になるように各色光の光量を調節し、しかるのち写真を挿入して合成した。

このようにして合成されたカラー写真を用い、色度を測定すると同時に、地上用カメラ(アサヒペンタックス6×7)により、スクリーン上の合成写真を撮影した。ただし、スクリーンの色温度は3,600 K°であるため色温度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、適正なカラーに再現されるようにした。

## 8. 色度測定

合成カラー写真の色彩を表現する方法として、マンセルの色票帳 (Munsell Book of Color) などのような標準となる色票をよりどころとして、肉眼視により識別する方法がある。しかしこの方法では、観察者ごとに異なった結果をうるものが考えられるので、CIE 1960 UCS 色度図(図-8)の座標値  $u, v$  を用いることにした。

ここで使用した色度測定装置は、濃度測定の場合と同様に、Quick Color Eye (ACM-4) である。また、測定口径は濃度測定の場合と同じである。透過率  $Y$  は1としたが、 $x, y$  は

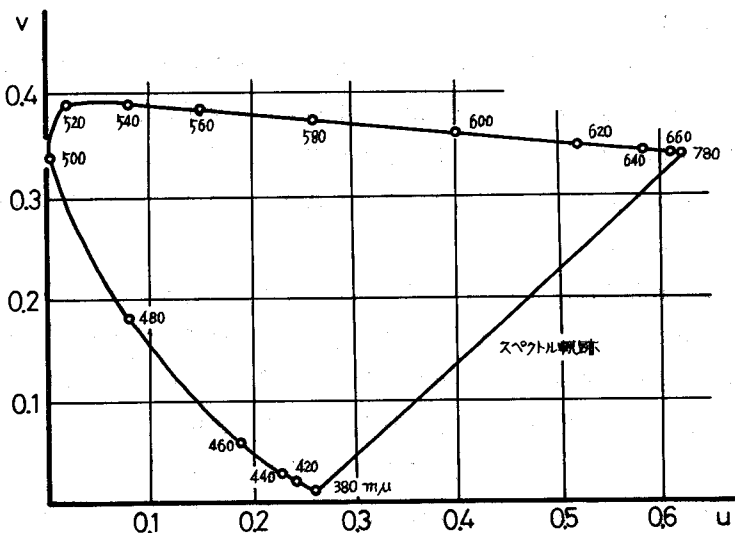


図-8 CIE 1960 UCS 色度図

CIE 1931 色度図の座標値であるため、これらを次式により、 $u$ 、 $v$ に変換した。

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$v = \frac{6y}{-2x+12y+3}$$

## 9. 色彩による判別

合成カラー写真を用いてえられた座標値  $u$ 、 $v$  により、樹木の健全性に関連させて判別分析を行なったが、この方法は濃度による分析と同じ方法によっている。

## 10. 判別効果の吟味

合成カラー写真による判別分析の結果からえられた判別率にもとづき、異なったバンド別写真の組み合わせごとに、健全性の判別効果を吟味し、この種判別に最も効果的な組み合わせを選んだ。

### ま と め

樹木の健全性の判別について、写真撮影にはじまり、濃度測定、色度測定、判別分析などをへて、判別効果の吟味にいたるまでの手順とその内容は、以上のとおりである。

これらの手順は、いずれも重要な役割をもつものであるが、これらのなかに共通する重要な課題は、土地条件、周辺光量などの写真特性および測定器機の使用時の測定条件などによる濃度や色度への影響を把握し、これらの諸条件をコントロールして、すべての供試木について同一の濃度および色度条件をもたせ、適正な判別ができるようにすることである。このことはこの種研究をすすめるために欠くことのできない重要な前提条件である。

## 第5節 研究の結果

### 1. 地上調査

地上調査の対象となった樹木本数は、前掲表-4のごとく、ドイツウヒ 319 本、トドマツ 246 本で、このうちドイツウヒは健全木が 202 本で全体の 63.3%、不健全木が 117 本で同じく 36.7% であった。また、トドマツは健全木が 185 本で全体の 75.2%、不健全木が 61 本で同じく 36.7% であった。

### 2. 濃度による判別

判別分析にあたって、判別すべき対象が、胸高直径、樹高、材積および樹種などのように量的にも質的にも明らかに区分できるものであるときは、それを真の値として、判別の結果を判別適中率で表わすことができる。しかし、判別すべき対象が、一定の概念規定にもとづいた分類などによるものであるときは、それが普遍化されるべきものであっても、それを真の値とするには問題がある。したがって、ここでは、地上調査の結果えられた健全性に対する判別率として表現することとした。

## A. 単バンドによる判別

ドイツトウヒおよびトドマツのバンド別濃度特性として、ドイツトウヒでは B, G および R バンド、トドマツでは G, R および IR バンドにおいて、それぞれ健全木と不健全木の平均濃度の間に有意な差があることが、すでに筆者によって認められている。ここで、さきに述べた判別関数による分析手法により、健全木と不健全木を判別し、地上調査にもとづく健全性に対する判別率を求めた。これは、表-7 および 表-8 に示すとおりである。

これによれば、両樹種の判別率は、ドイツトウヒでは、R バンドが最も高い値を示し、ついで B, G バンドの順となるが、このうち G バンドは、R および B バンドに比べ、やや低い値であった。また、トドマツでは、G および R バンドが同率で、IR バンドが両者よりもやや低い値を示していた。

しかし、総体的に両樹種とも、とりわけトドマツにおいては、60% 以下の判別率を示すに

表-7 バンド別判別結果 (ドイツトウヒ)

Table 7. Identification result to each band (Common spruce)

Band	Investigation result	Number of sample tree	Identification result		Discriminant ratio (%)
			Number of vigorous tree	Number of non-vigorous tree	
B	Vigorous	202	127	75	65.8
	Non-vigorous	117	34	83	
G	Vigorous	202	126	76	61.4
	Non-vigorous	117	47	70	
R	Vigorous	202	138	64	66.1
	Non-vigorous	117	44	73	

Note: Common spruce; *Picea excelsa* LK.

表-8 バンド別判別結果 (トドマツ)

Table 8. Identification result to each band (Todo fir)

Band	Investigation result	Number of sample tree	Identification result		Discriminant ratio (%)
			Number of vigorous tree	Number of non-vigorous tree	
G	Vigorous	185	103	82	55.3
	Non-vigorous	61	28	33	
R	Vigorous	185	98	87	55.3
	Non-vigorous	61	23	38	
IR	Vigorous	185	90	95	49.2
	Non-vigorous	61	30	31	

Note: Todo fir; *Abies sachalinensis* Mast.

すぎず、単バンドによるこの種判別は、効果的でない。

## B. 2バンドの組合わせによる判別

単バンドによる判別は、前述のように、さほど効果的とはいえないので、2つ以上のバンド別濃度の組合わせによる判別率の増大を期した。この分析で用いた判別関数  $Y$  は、B, G, R および IR バンドの濃度をそれぞれ  $D_b$ ,  $D_g$ ,  $D_r$  および  $D_{r'}$  として、4バンドの組合わせにあつては、次式が使用される。

$$Y = a_1 D_b + a_2 D_g + a_3 D_r + a_4 D_{r'}$$

したがって、これにより判別率を求めたとき、それぞれのバンド別濃度特性の相互作用により判別率が単バンドにおけるそれよりも増大する場合と、低下する場合が考えられる。しかし、この判別関数を用い、想定されるすべてのバンド別組合わせごとの判別率を求め、このなかから、より高い判別率をもつバンド別組合わせを選びだすことができれば、この研究をすすめていくために重要な役割を果すものである。高橋<sup>9)</sup>は、樹種の識別について、より効果的なバンド別組合わせを知るためこの手法を用い、それが有用かつ効果的な方法であることを立証している。

ここで、B, G, R および IR の4バンドによる場合、2バンドの組合わせでは、B×G, B×R, B×IR, G×R, G×IR および R×IR の6通り、3バンドの組合わせでは、B×G×R, B×G×IR, B×R×IR および G×R×IR の4通りと、4バンドの組合わせによる B×G×R×IR の1通りで、計11通りの組合わせが成立する。したがって、このすべての組合わせについて、それぞれ判別関数を作成し、判別率を求めた。ただし、これららの判別関数は、すべて5%の水準で判別率が求められるように作成されている。

まず、2バンドの組合わせについて、ドイツトウヒでは、B×G, B×R, B×IR, G×R, G×IR および R×IR の判別関数を、それぞれ  $Y_{bg}$ ,  $Y_{br}$ ,  $Y_{br'}$ ,  $Y_{gr}$ ,  $Y_{gr'}$  および  $Y_{rr'}$  とし、B, G, R および IR バンドの濃度をそれぞれ  $D_b$ ,  $D_g$ ,  $D_r$  および  $D_{r'}$  とすれば、以下のようになる。

$$Y_{bg} = 0.7847 D_b + 0.3178 D_g$$

$$Y_{br} = 0.4594 D_b + 0.6562 D_r$$

$$Y_{br'} = D_b$$

$$Y_{gr} = D_r$$

$$Y_{gr'} = 1.3016 D_g - 0.8560 D_{r'}$$

$$Y_{rr'} = 1.2369 D_r - 0.7454 D_{r'}$$

この結果について、判別関数  $Y_{br'}$  および  $Y_{gr}$  は、それぞれ  $D_b$  および  $D_r$  となり、この組合わせによる判別率が、B および R バンドと同じになることを示している。また、トドマツでは、判別関数は以下のようになる。

$$Y_{bg} = -0.6030 D_b + 1.2389 D_g$$

$$Y_{br} = -0.6732 D_b + 1.2547 D_r$$

$$Y_{br'} = D_{r'}$$

$$Y_{gr} = D_r$$

$$Y_{gr'} = -0.9245 D_g + 0.8576 D_{r'}$$

$$Y_{rr'} = 0.8839 D_r - 0.5310 D_{r'}$$

この結果について、判別関数  $Y_{br'}$  および  $Y_{gr}$  は、それぞれ  $D_{r'}$  および  $D_r$  となり、ドイツウヒの場合と同様、これらの組み合わせによる判別率が、IR および R と同じになることを示している。

つぎに、ドイツウヒについて、各組み合わせごとに、上記各判別関数から判別率を求めたものが、表-9である。これによれば、判別率が最も高い組み合わせは R×IR であり、ついで B×R, B×G, B×IR, G×IR の順となり、最も低いものは G×R であった。これらのうち、B×IR および G×R の組み合わせは、すでに述べたように、それぞれ B および G バンドの判別率と同じである。すなわち、この2通りの組み合わせにあっては、組み合わせによる判別効果が認められないことを示している。さらに、この2通りの組み合わせを除き、R×IR の判別率と他の組み合わせによるそれとの差をみると、B×R は1.9% であり、その他はそれぞれ B×G が4.1%、G×IR が6.6% である。ここで、R×IR および B×R の2通りの組み合わせは、判別の効果が近似しているものとみてよい。

同様に、トドマツの判別率を表-10によってみると、判別率が最も高い組み合わせは、B×R

表-9 2バンドの組み合わせによる判別結果(ドイツウヒ)

バンド別組み合わせ	地上調査結果	供試木本数	判別結果		判別率 (%)
			健全木本数	不健全木本数	
R×IR	健全木	202	156	46	71.5
	不健全木	117	45	72	
B×R	健全木	202	159	43	69.6
	不健全木	117	54	63	
B×G	健全木	202	159	43	67.4
	不健全木	117	61	56	
B×IR	健全木	202	127	75	65.8
	不健全木	117	34	83	
G×IR	健全木	202	139	63	64.9
	不健全木	117	49	68	
G×R	健全木	202	126	76	61.4
	不健全木	117	47	70	

表—10 2バンドの組合わせによる判別結果(トドマツ)

バンド別組合わせ	地上調査結果	供試木本数	判別結果		判別率 (%)
			健全木本数	不健全木本数	
B×R	健全木	185	122	63	63.0
	不健全木	61	28	33	
R×IR	健全木	185	119	66	61.0
	不健全木	61	30	31	
B×G	健全木	185	120	65	60.6
	不健全木	61	32	29	
G×IR	健全木	185	108	77	57.3
	不健全木	61	28	33	
G×R	健全木	185	98	87	55.3
	不健全木	61	23	38	
B×IR	健全木	185	90	95	49.2
	不健全木	61	30	31	

であり、ついでR×IR, B×G, G×IR, G×Rの順であり、最も低いものはB×IRであった。これらのうち、G×RおよびB×IRの組合わせは、ドイツトウヒの場合と同様に、それぞれRおよびIRバンドの判別率と同じである。すなわち、この2通りの組合わせにあっては、組合わせによる判別効果が認められないことを示している。さらに、この2通りの組合わせを除き、B×Rの判別率と他の組合わせによるそれとの差をみると、R×IRは2.0%、B×Gが2.4%、G×IRが5.7%であった。このことは、ドイツトウヒの場合と同様に、B×R, R×IRおよびB×Gの3通りの組合わせは、判別の効果が近似しているものとみてよい。

以上、ドイツトウヒおよびトドマツにおける2バンドの組合わせによる判別率から、共通していえることは、R×IRおよびB×Rの2通りの組合わせが、樹木の健全性の判別のためにより効果的であったといえる。

### C. 3バンドの組合わせによる判別

3バンドの組合わせについて、ドイツトウヒでは、B×G×R, B×G×IR, B×R×IRおよびG×R×IRの判別関数を、それぞれ $Y_{bgr}$ ,  $Y_{bgr'}$ ,  $Y_{brir}$ および $Y_{grir'}$ とし、B, G, RおよびIRバンドの濃度をそれぞれ $D_b$ ,  $D_g$ ,  $D_r$ および $D_{ir}$ とすれば、以下のようになる。

$$Y_{bgr} = -0.4968 D_b + 0.3650 D_g - 0.9101 D_r$$

$$Y_{bgr'} = -0.1515 D_b - 0.7767 D_g + 0.5886 D_{r'}$$

$$Y_{brir'} = -0.1654 D_b - 1.0970 D_r + 0.6856 D_{ir'}$$

$$Y_{grir'} = 1.2369 D_r - 0.7454 D_{ir'}$$

この結果について、判別関数 $Y_{grir'}$ は、2バンドの組合わせR×IRの関数 $Y_{rr'}$ と同じになる

ことを示している。また、トドマツでは判別関数は以下ようになる。

$$Y_{bgr} = -0.8200 D_b + 0.4362 D_g + 1.0563 D_r$$

$$Y_{bgr'} = 0.4923 D_b - 1.1647 D_g + 0.8369 D_r'$$

$$Y_{br'r'} = 0.5432 D_b - 1.1257 D_r + 0.4255 D_r'$$

$$Y_{grr'} = -0.4328 D_g - 0.6064 D_r + 0.6468 D_r'$$

つぎに、ドイツウヒについて、上記各判別関数から判別率を求めたものが、表-11である。これによれば、判別率が最も高いものは、B×R×IRであり、ついでG×R×IR、B×G×RおよびB×G×IRの順となっている。このなかにあつて、G×R×IRの組合わせによる判別率は、R×IRの組合わせによるものと同じであつた。このことは、G×R×IRの組合わせにあつては、Gバンドの効果がなかつたことを示している。さらに、B×R×IRの判別率と他の組合わせによるそれとの差をみると、G×R×IRが0.9%、B×G×RおよびB×G×IRが2.5%で、G×R×IRの判別の効果はB×R×IRのそれと近似しているものとみてよい。

表-11 3バンドの組合わせによる判別結果(ドイツウヒ)

バンド別組合わせ	地上調査結果	供試木本数	判別結果		判別率 (%)
			健全木本数	不健全木本数	
B×R×IR	健全木	202	163	39	72.4
	不健全木	117	49	68	
G×R×IR	健全木	202	156	46	71.5
	不健全木	117	45	72	
B×G×R	健全木	202	158	44	69.9
	不健全木	117	52	65	
B×G×IR	健全木	202	154	48	69.9
	不健全木	117	48	69	

表-12 3バンドの組合わせによる判別結果(トドマツ)

バンド別組合わせ	地上調査結果	供試木本数	判別結果		判別率 (%)
			健全木本数	不健全木本数	
B×G×R	健全木	185	125	60	65.4
	不健全木	61	25	36	
G×R×IR	健全木	185	121	64	62.6
	不健全木	61	28	33	
B×G×IR	健全木	185	117	68	61.0
	不健全木	61	28	33	
B×R×IR	健全木	185	117	68	59.8
	不健全木	61	31	30	

同様に、トドマツについて、上記の各判別関数から判別率を求めたものが、表-12である。これによれば、判別率が最も高い組み合わせは、 $B \times G \times R$ であり、ついで $G \times R \times IR$ 、 $B \times G \times IR$ の順となり、最も低いものは $B \times R \times IR$ であった。

#### D. 4バンドの組み合わせによる判別

4バンドの組み合わせについて、ドイツトウヒでは、 $B \times G \times R \times IR$ の判別関数を $Y_z$ とし、 $B$ 、 $G$ 、 $R$ および $IR$ バンドの濃度を、それぞれ $D_b$ 、 $D_g$ 、 $D_r$ および $D_{ir}$ とすれば、 $Y_z$ は以下のようなになる。

$$Y_z = 0.1654 D_b - 1.0969 D_r + 0.6856 D_{ir}$$

この結果について、判別関数 $Y_z$ は、3バンドの組み合わせ $B \times R \times IR$ の判別関数 $Y_{brir}$ と等しく、4バンドの組み合わせにおいて、 $G$ バンドの効果がなかったことを示している。同様に、トドマツでは、判別関数 $Y_z$ は以下のようなになる。

$$Y_z = 0.7298 D_b - 0.6587 D_g - 0.8001 D_r + 0.5737 D_{ir}$$

これによれば、トドマツではドイツトウヒと異なり、すべてのバンド別濃度が判別にかかわりをもっていることを示している。

つぎに、上記の各判別関数からえられた判別率は、表-13のとおりである。このうち、ドイツトウヒの判別率は、さきに明らかにした、3バンドの組み合わせのうちの $B \times R \times IR$ のものと同しく、トドマツでは、 $B \times G \times R$ について2番目に高い値を示した。

表-13 4バンドの組み合わせによる判別結果

種 属	地上調査結果	供試木本数	判 別 結 果		判 別 率 (%)
			健全木本数	不健全木本数	
ドイツトウヒ	健全木	202	163	39	72.4
	不健全木	117	49	68	
トドマツ	健全木	185	125	60	64.2
	不健全木	61	28	33	

#### E. ま と め

これまで、単バンドごと、および11通りのすべての組み合わせによる、健全性の判別について述べたが、これらのうち、判別率について以下のようにとりまとめることができる。

まず、ドイツトウヒでは、表-14に示すように、単バンドよりもバンド別組み合わせの数が多くなるほど、判別率が高くなる傾向がうかがわれる。このことは、組み合わせの数がふえることによる相乗効果とみてよい。表-14の左欄に示してある各バンド別組み合わせの内訳をみると判別率の順位が上位にあるものには、すべて $R$ および $IR$ バンドがふくまれている。とりわけ $R \times IR$ の判別率は、第3位を占め、しかも第1位のそれと僅差であることに注目したい。このことは、 $R$ および $IR$ バンドが、ドイツトウヒの判別効果を高めるために大きな役割を果たした

ことを示している。このうち、Rバンドについては、筆者ら<sup>14)</sup>が行なった模型実験によれば、枯死木と健全木の平均濃度の差が、B, G, RおよびIRの4バンドのうち、Rバンドが最も大きかったこと、また、江森ら<sup>81)</sup>が行なった0.4~1.0 $\mu$ のスペクトル領域での反射率測定において、Rバンドのスペクトル領域で、枯死木と健全木の反射率の差が、他の領域におけるものよりも大であったことなどから、Rバンドが樹木の健全性の判別に大きく寄与するとみてよい。IRバンドでは健全木と不健全木との間に有意な差が認められないが、Rバンドとの組み合わせにより相乗的な効果をもたらしている。また、Bバンドがふくまれる組み合わせは、その判別率の順位が第5位から第8位の間が多く、RおよびIRバンドがふくまれる組み合わせより劣っている。このことは、このバンドが、他のバンドとの組み合わせにおいて、判別の相乗効果として、明瞭な効果は認められないことを示している。さらに、Gバンドがふくまれる組み合わせによるものの順位はバラツキが多く、このバンドは、組み合わせによる判別の相乗効果として、プラスにもあるいはマイナスにも作用し、一定した効果をもたないことを示している。しかし、BおよびGバンドをR $\times$ IRの組み合わせに付加することによって、いずれもその判別率を高めることに役立っている。

つぎに、トドマツでは、表-15に示すように、ドイツトウヒと同様、バンド別組み合わせの数が増えるほど判別率が高くなる傾向がうかがわれる。そして、表-15の左欄に示してある各バンド別組み合わせの内訳をみると、RおよびBバンドがふくまれる組み合わせによる判別率の順位は、比較的高い位置にある。とりわけ

表-14 判別結果一覧(ドイツトウヒ)

Table 14. List of identification result (common spruce)

Band combination				Discriminant ratio (%)	Order
B	G	R	IR		
*	*	*	*	72.4	1
*		*	*	72.4	1
	*	*	*	71.5	3
		*	*	71.5	3
*	*	*		69.9	5
*	*		*	69.9	5
*		*		69.6	7
*	*			67.4	8
		*		66.4	9
*			*	65.8	10
*				65.8	10
	*		*	64.9	12
	*	*		61.4	13
	*			61.4	13

表-15 判別結果一覧(トドマツ)

Table 15. List of identification result (Todo fir)

Band combination				Discriminant ratio (%)	Order
B	G	R	IR		
*	*	*		65.1	1
*	*	*	*	64.2	2
*		*		63.0	3
	*	*	*	62.6	4
*	*		*	61.0	5
		*	*	61.0	5
*	*			60.0	7
*		*	*	59.8	8
	*		*	57.3	9
	*	*		55.3	10
		*		55.3	10
	*			55.3	10
*			*	49.2	13
			*	49.2	13

B×Rの組合わせは、第3位を占め、しかもこれによる判別率は、第1位のそれと僅差であることに注目したい。このことは、トドマツではRおよびBバンドが、この種の判別に大きい役割を果たしたことを示すものである。このうち、Rバンドについては、ドイツトウヒと同じ理由により、判別効果を高めている。Bバンドについては、健全木と不健全木との間に有意な差が認められず、Rバンドの組合わせにより、相乗的効果をもたらしている。また、GバンドおよびIRバンドがふくまれる組合わせによる判別率の順位をみると、バラツキが多く、これらのバンドは、相乗効果としてプラスにも、あるいはマイナスにも作用し、一定した効果をもたないことを示している。しかし、これらのバンドを、B×Rの組合わせに付加することによって、いずれもその判別率を高めることに役立っている。

### 3. 樹冠断面積および樹高と濃度の組合わせによる識別

これまで、バンド別濃度の組合わせによる健全性の判別について述べてきたが、この結果をみると、判別率が最高なのは、ドイツトウヒで72.4%、トドマツで65.5%であった。この判別率を、濃度以外の要素を組合わせることによって、さらに向上させうることができれば航空写真によるこの種識別に貢献するところ大である。

人工林では、その地形的および気象的諸要件が同一であり、かつ樹種・樹齢が等しいとき、生育状況が良好なものほど、一般に樹冠の水平的拡がり、すなわち樹冠断面積が大きく、また樹高も高いことが知られている<sup>87)</sup>。したがって、これらは、樹木の生育状況を知るための重要な要素であると考えられる。この研究の対象となった樹木は、上記の条件をみたしているものとみてよい。また、研究の手順(本章第4節第4項)において述べたように、樹冠断面積および樹高を測定し、これらの要素ごとに健全木と不健全木との間にそれぞれ有意な差があることが認められた。しかも、これらの要素は、いずれも航空写真を用いて、直接的に判読できるものである。そこでこれらの要素を、バンド別濃度の組合わせに加えることによって、判別率を向上させることができるかどうかの吟味を行なった。これは、判別率の最も高かったRバンド、および2バンドの組合わせにおけるR×IR、B×Rに、それぞれ樹冠断面積および樹高を組合わせた判別関数を作成し、その判別率を吟味してみた。さらに、3バンドの組合わせのすべて、および4バンドのものについても、同様の方法を用いて判別率を求めた。

#### A. 樹冠断面積と濃度の組合わせによる識別

R、B×R、R×IR、B×G×R、B×G×IR、B×R×IR、G×R×IR および B×G×R×IRの8つの組合わせに、樹冠断面積を組合わせたときの判別率は、表-16および表-17に示してある。

まず、表-16のドイツトウヒについてみると、樹冠断面積を組合わせたものと、濃度のみによる判別率との差によって、一様に判別率が向上することがわかる。しかも、すべての組合わせにおいて、判別率がほぼ近似する値を示していることが特徴的である。このことは、バンド別組合わせのいかににかかわらず、それらに樹冠断面積を組合わせることによって、判別率

表-16 樹冠断面積と濃度の組合わせによる判別結果 (ドイツトウヒ)

バンド別組合わせの種類	判別率 (%)	濃度による判別率との差 (%)
R×C.A.	78.2	11.8
B×R×C.A.	78.7	9.1
R×IR×C.A.	78.2	6.7
B×G×R×C.A.	79.3	9.4
B×G×IR×C.A.	79.3	9.4
B×R×IR×C.A.	78.7	6.3
G×R×IR×C.A.	78.2	6.7
B×G×R×IR×C.A.	79.3	6.9

註) C.A.; 樹冠断面積 (m<sup>2</sup>)

表-17 樹冠断面積と濃度の組合わせによる判別結果 (トドマツ)

バンド別組合わせの種類	判別率 (%)	濃度による判別率との差 (%)
R×C.A.	71.7	16.4
B×R×C.A.	67.6	4.6
R×IR×C.A.	70.5	9.5
B×G×R×C.A.	72.3	6.9
B×G×IR×C.A.	70.5	9.5
B×R×IR×C.A.	72.8	13.0
G×R×IR×C.A.	69.9	7.3
B×G×R×IR×C.A.	72.3	8.1

註) C.A.; 樹冠断面積 (m<sup>2</sup>)

を向上させうることを示すものである。

つぎに、表-17のトドマツについてみると、樹冠断面積を組合わせることにより、ドイツトウヒと同様、一様に判別率が向上することがわかる。

### B. 樹高と濃度の組合わせによる識別

樹冠断面積と濃度の組合わせによる識別の場合と同様に、8つのバンド別組合わせに、樹高を組合わせたときの判別率は、表-18および表-19に示してある。

まず、表-18のドイツトウヒについてみると、樹冠断面積と濃度を組合わせた場合と同様に、健全性の判別率が一様に向上することがわかる。また、その判別率は、すべてほぼ近似した値を示している。このことは、樹高もまた、判別率の向上に、有効な役割を果しうることを示している。

表-18 樹高と濃度の組合わせによる判別結果 (ドイツトウヒ)

バンド別組合わせの種類	判別率 (%)	濃度による判別率との差 (%)
R×T.H.	78.2	11.8
B×R×T.H.	81.6	12.0
R×IR×T.H.	78.2	6.7
B×G×R×T.H.	81.6	11.7
B×G×IR×T.H.	81.6	11.7
B×R×IR×T.H.	81.6	9.2
G×R×IR×T.H.	78.2	6.7
B×G×R×IR×T.H.	81.6	9.2

註) T.H.; 樹高 (m)

表-19 樹高と濃度の組合わせによる判別結果 (トドマツ)

バンド別組合わせの種類	判別率 (%)	濃度による判別率との差 (%)
R×T.H.	64.7	9.4
B×R×T.H.	67.1	4.1
R×IR×T.H.	65.3	4.3
B×G×R×T.H.	72.3	6.9
B×G×IR×T.H.	67.1	6.1
B×R×IR×T.H.	65.3	5.5
G×R×IR×T.H.	65.9	3.3
B×G×R×IR×T.H.	67.6	3.4

註) T.H.; 樹高 (m)

つぎに、表-19のトドマツについてみると、ドイツトウヒと同様に、判別率が一樣に向上することがわかる。したがって、ここでも樹高が健全性の判別率の向上に有効な役割を果たしていることがわかる。

**C. 樹冠断面積および樹高と濃度の組合わせによる識別**

樹冠断面積および樹高と、前記8つのバンド別組合わせによる判別率は、表-20および表-21に示してある。

まず、表-20のドイツトウヒについてみると、この場合もまた判別率が一樣に向上していることがわかる。表-21のトドマツも同様に判別率が向上している。しかし、この場合の判別率は、両樹種ともに、樹冠断面積の組合わせによるものと、樹高の組合わせによるものとの、ほぼ中間の値を示している。中村<sup>27)</sup>によれば、樹種・樹齢が等しい人工林にあっては、生育状況が良好な樹木ほど、樹冠の水平的拡がりが大きく、また樹高が高いことを述べている。そして同時に、樹冠の拡がりが大きくても、樹高が高いとは限らないとし、樹木の生育状況を樹冠の状態や樹高などから知ろうとする場合は、それらの状態を個別に把握すべきであるとしている。このことから推論すれば、上記のような結果をえたということは、樹冠断面積と樹高の組合わせにおいて、この両者が相互に相殺的に作用しあっているものといつてよい。

表-20 樹冠断面積・樹高と濃度の組合わせによる判別結果 (ドイツトウヒ)

バンド別組合わせの種類	判別率 (%)	濃度による判別率との差 (%)
R×C.A.×T.H.	77.2	10.8
B×R×C.A.×T.H.	76.1	6.5
R×IR×C.A.×T.H.	78.2	6.7
B×G×R×C.A.×T.H.	80.4	10.5
B×G×IR×C.A.×T.H.	80.4	10.5
B×R×IR×C.A.×T.H.	80.1	7.7
G×R×IR×C.A.×T.H.	78.2	6.7
B×G×R×IR×C.A.×T.H.	80.4	8.0

註) C.A.; 樹冠断面積 (m<sup>2</sup>)  
T.H.; 樹高 (m)

表-21 樹冠断面積・樹高と濃度の組合わせによる判別結果 (トドマツ)

バンド別組合わせの種類	判別率 (%)	濃度による判別率との差 (%)
R×C.A.×T.H.	67.1	11.8
B×R×C.A.×T.H.	67.2	4.2
R×IR×C.A.×T.H.	70.8	9.8
B×G×R×C.A.×T.H.	72.3	6.9
B×G×IR×C.A.×T.H.	67.1	6.1
B×R×IR×C.A.×T.H.	69.0	9.2
G×R×IR×C.A.×T.H.	67.8	5.2
B×G×R×IR×C.A.×T.H.	69.8	5.6

註) C.A.; 樹冠断面積 (m<sup>2</sup>)  
T.H.; 樹高 (m)

**D. ま と め**

バンド別濃度に、樹冠断面積および樹高を組合わせたときの判別率は、いずれも向上することが知られた。しかし、樹冠断面積と樹高を同時に組合わせたときは、それらを箇々に組合わせたものよりも低い判別率をえている。すなわち、ドイツトウヒでは、判別率は樹高の組合わせのものが最も高く、ついで樹冠断面積と樹高の組合わせ、樹冠断面積の組合わせの順となっている。また、トドマツは樹冠断面積の組合わせのものが最も高く、ついで樹冠断面積と樹

高の組合わせ、樹高の組合わせの順になっている。ここで、これらの判別率をみると、ほとんど大差が認められない。したがってこの場合、判別率を向上させるためには、樹冠断面積および樹高の要素のうち、いずれか1つを選び、それにバンド別濃度を組合わせることで十分であると考えてよい。

そこで、樹冠断面積と樹高のうち、いずれを選ぶべきかについて検討してみた。この両者はいずれも、航空写真を用いて判読できる要素であるが、このうち樹冠断面積は、樹冠直径測定板を用いることにより、航空写真上から容易に計測することができる。一方、樹高査定 of 正確さを期するためには、単木ごとに視差測桿を用いて、それぞれ測定しなければならないし、これを迅速に行なうためには相当の熟練度が要求される。したがって、その健全性を識別するときには、樹冠断面積とバンド別濃度の組合わせによる識別方法を採用することを提唱したい。

#### 4. 色彩による判別

第3項では、11通りのバンド別濃度の組合わせのそれぞれについて、健全性の識別効果を吟味した。この吟味は、判別関数により数理的に導きだされた判別率によっている。したがって、この方法によれば、判別率だけで健全性の判別に効果的な組合わせを選択することができる。しかし、選択された組合わせによって、いかなる画像がえられるのか、また、この画像を用いて実際に健全性を判別できるかどうかについての吟味はできない。そこで、各バンド別写真に、それぞれ異なった色光を与え、これを同一スクリーン上に合成させ、このカラー写真を用いて、健全性の判別効果を吟味した。

この吟味に先立ち、11通りの組合わせのうち、さきの濃度による判別結果のうち、とくに効果的であった5通りのバンド別組合わせを選び、カラー写真を合成している。また、ここで使用したマルチスペクトル・ビューワーは、3色による加色合成の機能をもつものであるため4バンドの組合わせによるカラー写真は、合成されていない。さらに、この合成に際し、バンド別写真ごとに与えた色光は、表-22 A および B に示してある。

これらのカラー写真を用い、ドイツトウヒおよびトドマツについて、判別効果を吟味した。この場合、濃度測定を行なったすべての供試木を対象として、吟味することが理想的である。このためには、さきに濃度測定に供した連続写真(ドイツトウヒ5枚、トドマツ8枚)のそ

表-22-A バンド別写真に与えた色光  
(ドイツトウヒ)

バンド別組合わせ	バンド別写真の色光			
	B	G	R	IR
R×IR			青	赤
B×G×R	青	緑	赤	
B×G×IR	青	緑		赤
B×R×IR	青		緑	赤
G×R×IR		青	緑	赤

表-22-B バンド別写真に与えた色光  
(トドマツ)

バンド別組合わせ	バンド別写真の色光			
	B	G	R	IR
B×R	青		赤	
B×G×R	青	緑	赤	
B×G×IR	青	緑		赤
B×R×IR	青		緑	赤
G×R×IR		青	緑	赤

れぞれについて、同一の色彩的条件をもつカラー写真がえられなければならない。しかし、現在の写真光学的技術水準では、いまだこのような条件を満足できるまでにいたっていない。このため、ここでは上記の連続写真のなかから、ドイツウヒおよびトドマツについて、供試木が最も数多く撮影されている写真をそれぞれ1枚ずつ選んだ。このようにしてえられた写真は、ドイツウヒではコース1のナンバー7、トドマツではコース1のナンバー5である。そして、これらの写真にふくまれている供試木本数は、ドイツウヒが174本、トドマツが173本であった。

ここで、これらのカラー写真による健全性の判別効果を、より客観的に知るため、色彩計を用い、単木ごとに色度を測定し、これを CIE 1960 UCS 色度座標に示した。さらに、これらの座標値を用い、濃度による判別の場合と同様に、判別関数を用いて判別率を求め、これにより判別効果を吟味した。また、同時に肉眼視により、健全木および不健全木の色彩的特徴を知り、それによる判別についても吟味した。この結果は以下のとおりである。

#### A. ドイツウヒ

ドイツウヒについて、バンド別濃度の組合わせのなかで、とくに判別効果が良好であった5通りの組合わせは、4バンドの組合わせを除き、 $B \times R \times IR$ 、 $G \times R \times IR$ 、 $R \times IR$ 、 $B \times G \times R$  および  $B \times G \times IR$  をあげることができる。これらの組合わせによる合成カラー写真は、図版 III-1~図版 III-5 に示してある。

これらのカラー写真により、単木ごとの色度座標値を求め、これを用いてえられた判別率は、表-23 に示してある。これによれば、判別率が最も高かったものは、 $B \times G \times R$  であり、ついで  $B \times R \times IR$ 、 $R \times IR$ 、 $B \times G \times IR$  および  $G \times R \times IR$  の順であった。このうち、 $B \times G \times R$ 、 $B \times R \times IR$  および  $R \times IR$  の判別率はほぼ近似した値を示していた。これらに比べ、 $B \times G \times IR$  および  $G \times R \times IR$  のものは、やや低い値を示している。一方、これらの5通りの組合わせについて、さきのバンド別濃度の組合わせによる判別率の順位は、 $B \times R \times IR$ 、 $R \times IR$ 、 $G \times R \times IR$ 、 $B \times G \times R$  および  $B \times G \times IR$  の順であった。これを、色彩による判別率の順位と比べると、 $B \times G \times R$  が濃度によるときは、第4位に属していたものが、色彩によるときには第1位になったことが目立っている。ただし濃度によるときの判別率を前掲表-9 および 表-11 によってみると、いずれも組合わせにおいても、ほぼ近似した値を示していた。

また、図版 III-1~図版 III-5 を用い、肉眼視により、健全木および不健全木の色彩を、日本工業規格の色名表によって表わすと、 $B \times G \times R$  の組合わせでは、樹木は全体として緑色で表わされている。このうち、不健全木はより赤みがかかった緑色を呈している。また、 $B \times$

表-23 色彩による判別結果 (ドイツウヒ)  
Table 23. Identification result of color (Common spruce)

Band combination	Discriminant ratio (%)
$B \times G \times R$	83.3
$B \times R \times IR$	82.2
$R \times IR$	78.2
$B \times G \times IR$	74.3
$G \times R \times IR$	74.3

R×IR, B×G×IR および G×R×IR のそれぞれの組み合わせでは、樹木は全体として赤紫色で表わされ、このうち、不健全木はより青みがかかった赤紫色を呈している。また、R×IR では、樹木は全体として青紫色で表わされ、このうち、不健全木はより青みがかかった青紫色を呈している。そして、これらの合成カラー写真のうち、B×G×R, B×R×IR および R×IR の写真では、上記のような色彩的特徴により、健全木と不健全木を明らかに判読することができた。

## B. トドマツ

トドマツについて、ドイツトウヒと同様に、バンド別濃度の組み合わせのなかで、とくに判別効果良好であった5通りの組み合わせは、4バンドの組み合わせを除き、B×G×R, B×R, G×R×IR, B×G×IR および B×R×IR をあげることができる。これらの組み合わせによってできた合成カラー写真は、図版 IV-1~図版 IV-5 に示してある。

これらの写真を用い、ドイツトウヒと同様に、単木ごとに色度を測定し、この測定値により、判別率を求めたものが、表-24 である。これによれば、判別率が最も高かったものは、B×R×IR であり、ついで B×G×R, G×R×IR, B×R および B×G×IR の順であった。これらのうち、B×R×IR, B×G×R および G×R×IR の判別率は、ほぼ近似した値を示していた。これらに比べて、B×R および G×R×IR は、やや低い値を示している。一方、これらの5通りの組み合わせについて、さきのバンド別濃度の組み合わせによる判別率の順位は、B×G×R, B×R, G×R×IR, B×G×IR および B×R×IR の順であった。これを、色彩による判別率の順位と比べると、B×R×IR が濃度によるときは第5位であったものが、色彩によるときは第1位にあがったことが目立つ。

同様に、濃度によるときは、第2位であった B×R が、色彩によるときは、第4位であったことが目立つ。ただし、濃度によるときの判別率を前掲表-10 および表-12 によってみるといずれの組み合わせにおいても、比較的近似した値を示していた。

また、図版 IV-1~図版 IV-5 を用い、肉眼視により、ドイツトウヒの場合と同様に、健全木および不健全木の色彩をみると、B×G×R では、樹木は全体として緑色で表わされ、このうち不健全木は、より赤みがかかった緑色を呈する。また、B×R×IR, G×R×IR および B×G×IR については、樹木は全体として赤紫色で表わされ、このうち不健全木は青みがかかった赤紫色を呈している。さらに、B×R では、樹木は全体として青紫色で表わされ、このうち不健全木は青みがかかった青紫色を呈している。これらの合成写真ごとの色彩的特徴は、ドイツトウヒの場合と同様である。そして、これらの合成カラー写真のうち、B×R×IR, B×G×R および G×R×IR の写真では、上記のごとき色彩的特徴により、健全木と不健全木を明らか

表-24 色彩による判別結果(トドマツ)

Table 24. Identification result of color (Todo fir)

Band combination	Discriminatio ratio (%)
B×R×IR	82.4
B×G×R	80.4
G×R×IR	79.4
B×G×IR	72.6
B×R	72.6

に判読することができた。

### C. ま と め

以上、5通りの組み合わせによる合成カラー写真を用いた健全性の判別について、判別率によってそれぞれの判別効果をみると、ドイツウヒおよびトドマツに共通していえることは最も判別効果が高いと認められたものは、 $B \times G \times R$  および  $B \times R \times IR$  であった。ついで、 $R \times IR$  および  $G \times R \times IR$  であり、最も効果が低かったものは  $B \times G \times IR$  であった。

前記した本章第5節第2項のバンド別濃度による判別の結果において、 $R$  バンドに  $B$  および  $IR$  バンドを組合わせたものや、 $B$  または  $IR$  バンドのいずれかを組合わせたものの判別効果が高かったこと、およびこれらの組合わせに  $G$  バンドを組合わせたときには、判別効果に相殺的作用を及ぼす場合があることが認められている。したがって、色彩による判別においても、ほぼ同様の結果をえたものとみてよい。一方、従来の諸研究・諸調査においては、 $G \times R \times IR$  の組合わせ、すなわち赤外カラー写真が、樹木の健全性の判別に最も効果的であるとされてきた。しかし、ここでは、これと明らかに異なる結果をえたことを示している。そこで、ここでの結果がいかなる理由にもとづくかについて、考察する必要がある。

多くの高等植物の生長は光合成によってなされる。そして、この光合成は、色素形成に重要な関連をもつものとされている<sup>79),90),91)</sup>。緑葉植物の場合、この色素はクロロフィルであるといつてよい。ここでクロロフィルと光のエネルギーとの関連をみると、光の吸収が最も多い波長帯は、青色部と橙赤色部にあることが、多くの研究者らによって知られている<sup>73),77),84)</sup>。そして、緑色部が最も吸収率が低い。И. А. Шульгин<sup>79)</sup>によれば、植物の葉の形成と正常な生長を裏づけるものは、橙赤色部および青色部の吸収、とりわけ、前者のそれが重要であることを明らかにしている。とくに、KLESHNIN<sup>79)</sup>によれば、成熟葉の形成において、同一葉面積をうるために、橙赤色の光は、青色部の1/2で十分であるとしている。そして、D. M. GATES<sup>77)</sup>は0.68  $\mu$  付近すなわち橙赤色部の吸収波長帯が、リモートセンシングにおける植生調査に最も有効であることを指摘している。

つぎに、緑色部すなわち0.55  $\mu$  付近の領域の光と植物との関連について、玖村<sup>84)</sup>らによれば、緑色部の吸収は、植物の色素の含有量に関連をもち、青色部と橙赤色部の吸収は、色素の含有量が違って、大きな変化を示さないとしている。また、前掲 D. M. GATES<sup>77)</sup>は、この緑色部の反射は、緑被率に関連するもので、葉の密度を知るために有効であるとしている。これらの色素の含有量や葉の密度は、同一植物における生育の違いよりも、種の違いによるものが大きいとされている。

さらに、D. M. GATES や C. E. OLSON によれば、近赤外部の反射は緑色部のそれと近似し、葉の密度に関連すると述べている。そして、江森ら<sup>81)</sup>によれば、トドマツおよびエゾマツについて、健全苗と枯死苗の反射率の差は、橙赤色部における方が、近赤外部におけるときよりも大きく、健全性を知るためには、橙赤外部での反射特性を把握することが有効であるとし

ている。

以上のように、植物の生育状況と波長帯領域ごとの光エネルギーとの関連からみると、橙赤色部をふくむRバンドが、健全性を知るために、ここで用いられている4バンドのなかには、最も有効なバンドであると考えてよい。ついで、健全性に関連するものとして、青色部すなわちBバンドをあげることができる。そして、緑色部および近赤外部は、健全性というよりも、樹種の違いに関連するバンドとしてとらえられる。

したがって、ここでの色彩による判別において、 $B \times G \times R$  および  $B \times R \times IR$  が、より有効であるという結果をえたのは、RおよびBバンドが健全性を知るために、より効果的であり、GバンドとIRバンドが入れ代っても、大差のない効果を示したことにともづくものと考えてよい。

### 第6節 樹木の健全性の識別に関するまとめ

航空写真によって、樹木の健全性を知るために、ここではマルチスペクトル・イメージ方式による写真を用いた。そして、そのバンド別濃度特性を把握し、これにもとづいて、この種判別に最も効果的なバンド別写真の組み合わせを探ろうとした。

この結果、B、G、RおよびIRの4バンドの写真について、それぞれのバンド別濃度特性を、健全木および不健全木の判別率によってみると、ドイツトウヒおよびトドマツの両樹種とも、いずれも総体的に判別率が低く、単バンド写真の濃度による判別はむずかしいことがわかった。しかし、これらの4バンドのうち、Rバンドは他のバンドに比べて判別率が高かったことが目立ち、これは両樹種に共通して認められた。

つぎに、2つ以上のバンド別濃度の組み合わせによる判別率をみると、両樹種とも、組み合わせの数が多いほど、判別率が高いことが認められたが、とりわけRバンドをふくむ組み合わせによる判別率が高かったことが特徴的であった。とくに、ドイツトウヒにおいては、 $R \times IR$ 、トドマツにおいては $B \times R$ の組み合わせによる判別率が、 $B \times R \times IR$ 、 $B \times G \times R$ 、 $G \times R \times IR$  および  $B \times G \times R \times IR$  などの3バンドの組み合わせによるものと近似していたことが特筆されなければならない。

さらに、上記のようなバンド別濃度の組み合わせの判別率において、4バンドの組み合わせによるものを除いて、とくに高い値を示した組み合わせについて、樹種ごとにそれぞれ5通りの組み合わせを選び、この組み合わせごとにカラー写真を合成した。そして、この写真の色彩により樹木の健全性を判別したところ、 $B \times R \times IR$  および  $B \times G \times R$  が最も高い判別率を示し、ついで、 $R \times IR$  および  $G \times R \times IR$  の順となり、 $B \times G \times IR$  のそれが最も低かった。

以上のバンド別濃度の組み合わせによる判別効果と、合成カラー写真によるそれとを総合すると、この種判別におけるRバンドの役割が大きいことがわかるし、さらにこのバンドにBあるいはIRバンドを組合わせたものが、より判別効果が高いことがわかった。また、ここで、

R×IRの組合わせは、2バンドのすべての組合わせのなかで、判別効果が最も大きく、しかもこれより判別効果の大きかった3バンドの組合わせと近似していた。ここで筆者は、樹木の健全性を、バンド別濃度の組合わせによって、あるいは合成カラー写真によって判別しようとする場合は、R×IRの組合わせによって満足しうる効果をあげうるものであると考え、これを提唱したい。

ここで、とりわけ重要なことは、写真の濃度や色彩によるだけでなく、樹冠断面積および樹高、とくに樹冠断面積を組合わせることにより、濃度のみによる判別率を向上させることができることである。とくに、単バンドであるRバンドに組合わせた判別率が、2バンド、3バンドおよび4バンドのすべての組合わせに、樹冠断面積や樹高を組合わせたものの判別率と近似した値を示したことである。このことは、樹冠断面積や樹高による判読要素を、Rバンドの濃度に組合わせることによって、樹木の健全性を識別するために満足しうる効果がえられることを示している。

また、以上のような結果をうるため、前以って、樹木が生育している地形的条件、連続する写真ごとの現象・焼付条件ならびに周辺光量の違いなどによる、濃度への影響をあらかじめ把握している。そこでは、地形的条件は同一であることを認めえたが、後2者については影響を与えていることを知り、この両要素の違いによって、濃度値を補正した。このことは、航空写真を使用するこの種判別のための重要な前提条件であり、広い地域に生育する樹木を対象として、それらの健全性を知るためには、とくに重要である。

## 第6章 天然林の健全性

### 第1節 樹木の健全性と林分の健全性との関連

林業における航空写真の利用は、広域の森林を解析するために有効である。北海道の森林はその大部分が天然林であり、しかも、それらの多くは地利的条件にめぐまれない地域に存在している。したがって、北海道における航空写真の利用は、このような森林を対象とすることに重要な意義をみいだされる。しかし、これらの天然林は多様な樹種・胸高直径・樹高および樹齢などによって構成され、しかもそれぞれ異なった土地条件のもとに生育している。このため、天然林を対象とする航空写真による量的および質的解析にあたっては、人工林や単純な一斉林などを対象とする研究の成果を基礎として、これを天然林に敷衍する方法が採用されるべきである。とりわけ、天然林の健全性の識別を目的とするこの研究は、国の内外を問わずその緒についたばかりである。したがって、まず地形的条件が等しく、かつ同一の樹種と樹齢で構成される人工林を対象として、航空写真による健全性の識別を可能にする方法を探り、さらにそれによる識別効果を吟味することが、天然林の健全性を把握するための基礎的研究として重要である。この観点から、前5章で述べたように、まず人工林の単木を対象として基礎的研究を

行なった。しかし、天然林がもつ林木構成の複雑性や地形的条件の多様性を考えたとき、単木ごとに健全性を識別することは困難である。航空写真による解析の観点からすれば、単木の解析はいわば点的なものであり、林分のそれは面的なものといえることができる。したがって、林分をそれが位置する地形的特徴、および第2章第3節で述べたような樹冠層・樹種群・疎密度級および樹高級などによって分類し、その林分ごとに地上調査にもとづく一定の基準によって、健全性を評価することが必要である。

ここで重要なことは、航空写真の立体視により林分の分類を行なうことである。このことは、人工林における樹木の健全性の識別において、樹冠断面積や樹高を写真判読によって求め、これらを健全性の判別要素として濃度の要素に付加することにより、識別効果の向上に役立ったことに直接関連をもつものである。すなわち、このような林分分類は、単に林分ごとの濃度条件をコントロールすることだけのものではなく、識別効果を高めるための重要な役割を果していることを強調しておきたい。

さらに、地帯区分や林分の分類の必要性は、人工林の健全性の識別に関する結果から導きだされたものであり、それは以下のとおりである。

まず第1に、第5章第4節第4項の写真判読で述べたように、樹木の位置とりわけ斜面方位によって樹木の受光量が異なるため、写真像の濃度に影響を与えることを知った。このことは林分といえども例外ではなく、太陽光線に直接面する向日面と背日面とでは、同一の林分であっても林分像の濃度は異なるものとみてよい。

第2に、樹木の写真像の濃度は、樹種によって異なることが、多くの研究者によってすでに知られている<sup>7),9),92)</sup>。とりわけ、針葉樹の濃度と広葉樹のそれとの差は、肉眼視によっても判読できるほどである。したがって、林分内に生育する樹木の樹種構成、とくに針葉樹と広葉樹との混交歩合が、林分の濃度に影響を与えるものと考えてよい。

第3に、第5章第4節第4項で述べたように、樹木像の濃度は、隣接木の樹高との違いにより、樹高の低いものが高いものの陰影部にふくまれ、濃度に影響をうけることを知った。このことは、林分の樹冠層による分類、すなわち、それが複層林であるか、また二段林であるかさらに単層林であるかによって、濃度に影響を与えることを意味する。

第4に、林分像の濃度は、その樹種構成だけではなく、樹冠疎密度によっても影響をうけることが考えられる。樹冠疎密度が低ければ低いほど、樹冠におおわれていない林地は、下層植生や裸地などが写真上で判読される。そこで、これらの下層植生や裸地などの濃度が、林分の濃度に影響を与えるものと考えてよい。

第5に、樹高による影響である。このことについて、人工林での調査結果によれば、同一の樹種であっても樹高の差が濃度に影響を与えることを知った。このことから、同一の樹種構成をもつ天然林の林分においても、その平均林分高の違いが林分の濃度に影響を与えるものと考えてさしつかえない。

これらの地形的要素および林分の構成要素の違いによる影響について、5つの要素のうち、4つの要素を同一条件とし、残された1要素をいろいろに変化させ、平均値の差の検定を行なう方法により順次各要素ごとにこの方法をくり返し、濃度への影響があるか否かを調べた。この結果、すべての要素が濃度に影響を与えることを知った。

以上のような結果から、地帯区分および林分分類を行ない、同一の条件をもつ林分ごとに、一定の規準にもとづいて健全性を評価する必要があることがわかる。さらに、地帯区分と林分分類を行なうにあたり、両者の結果を直接対応させて、健全性に関連する濃度特性を把握するため、メッシュ法により区分する方法を採用した。このようにして、写真像の濃度および色彩と、健全性との関連を把握すれば、人工林の場合と同様の手順を用いて、天然林の健全性を、メッシュごとに区分された林分を単位として識別することができる筈である。

## 第2節 林分の健全性の評価方法

林分の健全性を知るためには、そこに生育する枯損木・類死木・折損木・形質不良木および虫菌害などの不健全木の本数や材積などの大小によって評価する方法が考えられる。しかしこれらの不健全木を、航空写真を用いて把握しようとする場合、立体視によるかあるいは写真像の濃度や色彩によらざるをえない。一方、樹木の濃度は、J. E. COLWELL<sup>93)</sup>が指摘しているように、樹冠上部の濃度に帰着する。このことは、色彩においても同様であると考えてよい。したがって、航空写真を用いて、上記のような不健全木を識別しようとする場合は、これらの樹木のうち、樹冠上部に何らかの欠陥をもつものは、明らかに識別できるものとする。一方筆者がこの研究対象地(本章第3節第1項参照)で行なった結果によれば、ha当りの全材積に対する不健全木の材積比率と、全樹冠占領面積に対する写真上に刺針された不健全木の樹冠占領面積比率との間に0.98という高い相関が認められた。このことは、地上調査における不健全木の材積による健全性の評価を、全樹冠占領面積に対する不健全木の樹冠占領面積比率で代表させることを示すものである。

ここで筆者は、地上調査の結果、写真上に刺針された不健全木の樹冠占領面積比率を写真上で測定し、その大小によって林分の健全性を評価する方法を採用した。この健全性の評価基準は、不健全木の樹冠占領面積比率が10%以下であるものを健全林分、10%以上のものを不健全林分とした。ここで、健全林分を10%以下としたのは、北海道における天然林においては、多くの調査結果<sup>50),51)</sup>から、全材積に対して10%程度の不健全木は一般的に認められているところであり、したがって、不健全木の樹冠占領面積比率が10%以下であれば、健全林分とみなしてよいと考えたことによる。

天然林の健全性の評価に関連して、小野<sup>16),17)</sup>は、林地内の林木の活力度の把握という観点から、指数化された目視による外見上の判定基準と、直径生長指数を用い、標本地における数本の標本木を評価して、林分の活力指数としている。この方法は、直径生長指数という長期

的な観点に立って評価することで、理論的にはすぐれた考え方といえることができる。しかし、数本の標本木によって評価すること、および、生長量指数は針葉樹のみを対象とするものであるため、複雑な構造をもつ天然林の林分を対象として評価するには、評価の結果に少なからざる誤差を生じ易いと考えられる。したがって、筆者の方法のように、地上調査において、林分内の全林木を対象とした調査にもとづいて、評価することがより妥当である。

### 第3節 研究の手順

天然林は人工林に比べ、多様な樹種・胸高直径・樹高および樹齢などによって構成されるきわめて複雑なもので、しかもそれぞれ異なった土地条件のもとに生育している。このため、写真像の濃度特性により単木的にその健全性を識別するよりも、林分を単位としてその平均濃度を測定し、その濃度特性を把握することによりすすめることがより効果的である。この観点から、以下の手順にしたがってこの研究をすすめた。

#### 1. 写真撮影

マルチスペクトル・イメージ方式により、1975年8月11日15時13分から14分にかけて、北海道大学中川地方演習林186林班の天然林を対象に、スペクトル領域をBバンド(0.4~0.5 $\mu$ )、Gバンド(0.5~0.6 $\mu$ )、Rバンド(0.6~0.7 $\mu$ )およびIRバンド(0.7~0.9 $\mu$ )に分割して撮影された(図-9および図版V-1~図版V-4)。これには、焦点距離100mmの国際マルチ

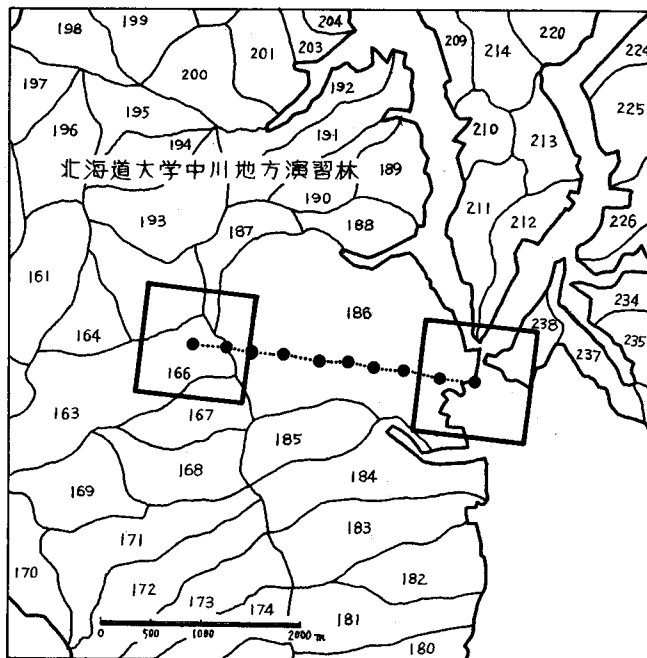


図-9 写真撮影箇所(コース5, ナンバー1~10)

スペクトル・カメラが使用され、そのフィルムサイズは  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 、写真原縮尺は  $1/20,000$  である。

この撮影に先立ち、 $7\text{ m} \times 7\text{ m}$ の反射光量既知のグレースケール3枚(黒色・灰色・白色)が地上に設置され、写真濃度測器値の補正を図りうるようにした。また、焼付けにあたっては第5章第4節第1項の写真撮影の場合と同様に、同一の地域にかかわる B, G, R および IR 写真をワンセットとして、それに標準濃度スケールが付されている。

## 2. 林分の分割単位

一般に、写真の立体視による林分の分類は、全域をメッシュに分割し、このメッシュを単位に、一定の基準を設けて判読する方法と、形や大きさにかかわらず同一の基準に相当する林分を判読しつつ区分する方法がある。林分像の濃度は、人工林における単木の濃度がそうであったように、そのタイプだけでなく、それが位置する地形的条件によって影響をうけるものと考えられる。したがって、林分のタイプと地形的条件を直接対応させつつ、健全性に関連性する濃度特性を把握するためメッシュ法によった。

つぎに、メッシュに分割された林分ごとの健全性を、そこに生立する不健全木の樹冠占領面積比率にもとづいて識別しようとする場合、メッシュの大きさをいかに決定するかが問題である。林分像の濃度  $D$  は、次式によりフィルムの透過率  $T$  で与えられるから、フィルムの条件が同じであれば、透過率はメッシュの大きさに比例して一様に変化するが、濃度の変化は一様でない。

$$D = \log \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

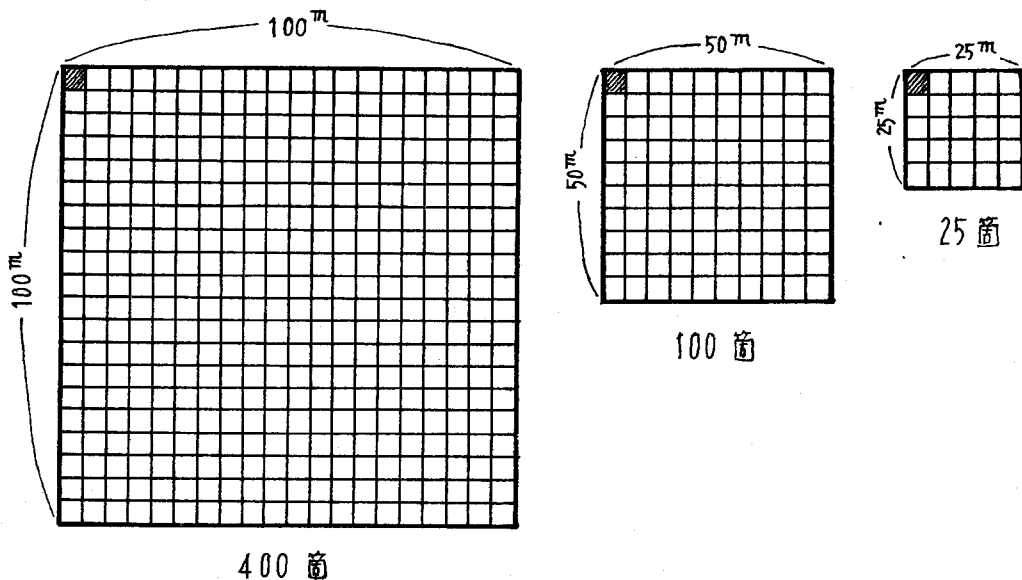


図-10 小メッシュの箇数

そこで、メッシュの大きさおよび不健全木の樹冠占領面積の変化にともなう、メッシュの平均濃度がどのように変化するかを知るため、モデル計算を行なって、メッシュの大きさを決定するためのよりどころとした。

このモデルは、図-10のように、メッシュの大きさを100 m×100 m、50 m×50 mおよび25 m×25 mの3種類とし、さらにそれぞれを5 m×5 mの正方形の小メッシュに区分している。したがって、この小メッシュは100 m×100 mメッシュに400箇、50 m×50 mメッシュに100箇、および25 m×25 mメッシュに25箇が、それぞれふくまれている。ただし、これらの区分は、同一条件をもつフィルム上でなされたものとし、1つの小メッシュが林分内の単木の樹冠断面積に相当するものと仮定する。さらに、この単木が不健全木である場合、健全木とは明らかに異なる濃度をもつものとしてモデル計算を行なった。すなわち、このような意味での不健全木に相当する箇数が増加するにしたがって、メッシュの大きさに応じてその平均濃度がどのように変化するかを、前記4バンドのフィルムごとに試算した。この場合、計算を容易にするために透過率を用いたが、各バンド別フィルムの透過率は、筆者の測定値を用いている。B、GおよびRバンドでは、すべての小メッシュが健全木であるときには最低透過率を、それらがすべて不健全木であるときには最高透過率を与えることとした。また、IRバンドでは、健全木の透過率が不健全木のそれよりも高い値を示すことが知られているため、他の3バンドの場合とは逆に、メッシュ内のすべての小メッシュが健全木であるときには最高透過率を、それがすべて不健全木であるときには最低透過率をもってあてておいた。これらは表-25に示すとおりである。また、メッシュ全体の値は平均値であるから、ここで、それぞれのメッシュ内にふくまれる小メッシュの透過率が同一であるとみてよい。小メッシュがすべて健全であるとき、および不健全であるときの値は、メッシュ全体のそれと同一になる。そこで、大きさの異なる3種類のメッシュごとに、不健全な小メッシュ箇数の増大にともなう、メッシュ全体の透過率の変化を計算し、この値を前記(2.1)式により濃度値に変換した。これを取りまとめたものが図-11である。これによれば、いずれのバンドにおいても、メッシュの大きさが小さいほど、不健全木の小メッシュの箇数が濃度に敏感に反応することがわかる。この研究における地上調査の結果によれば、0.2 ha (50 m×40 m) 当りの不健全木の樹冠占領面積比率は、最も多いもので全樹冠占領面積の約30%であった。この値をモデル計算にあてはめると、80箇の小メッシュのうち、不健全木の小メッシュが24箇あったことに相当する。この24箇の小メッシュが、大きさの異なる3種類のメッシュのいずれにも存在するものとするれば、メッシュサイズごとのバンド別濃度、およびこれと健全なメッシュとの濃度差は表-26のようになる。一般に、写真の濃度測定において、測定可能な微小濃度変化は、0.05であるとされている<sup>72)</sup>。

表-25 バンド別最高・最低透過率 (%)

バンド別	最 高	最 低
B	28.4	20.4
G	36.4	21.4
R	35.9	15.9
IR	29.1	4.1

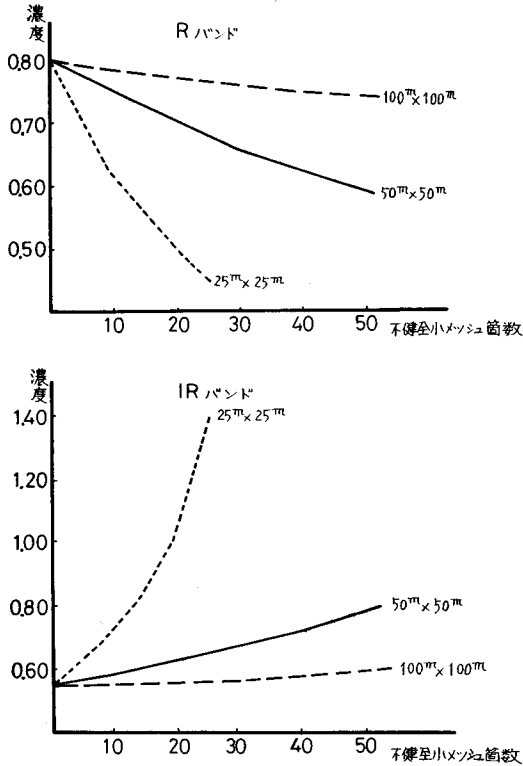


図-11 a 不健全小メッシュの箇数と濃度との関連 (B, G バンド)

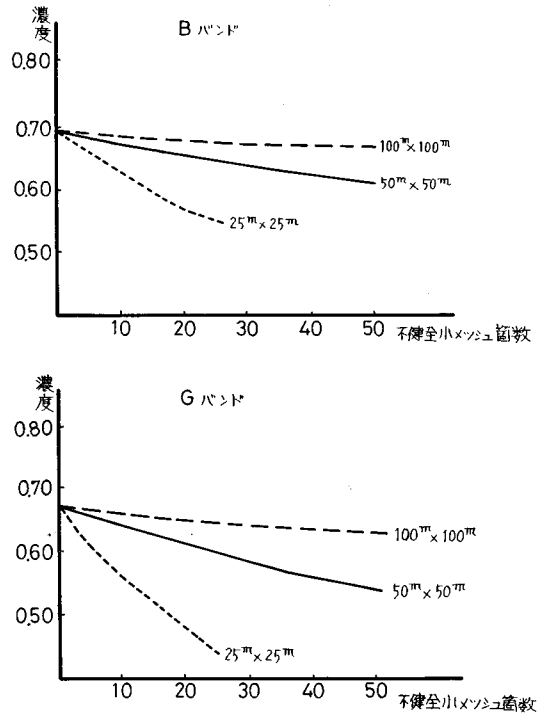


図-11 b 不健全小メッシュの箇数と濃度との関連 (R, IR バンド)

したがって、メッシュの大きさを 100 m×100 m とすると、不健全な小メッシュの箇数が 30% 以下であるときは、すべてのバンドにおいて、その健全なものとの濃度差が、0.05 以下であるため、不健全なもの割合を濃度により知ることは困難である。これに対して 50 m×50 m のメッシュを適用する場合には、これらの判別が可能になり、さらにこれよりも 25 m×25 m メッシュが有効であることがわかる。

表-26 メッシュサイズごとのバンド別濃度 (不健全小メッシュ 24 箇のとき)

メッシュサイズ (m)	バンド別			
	B	G	R	IR
100×100	0.68 (0.01)	0.65 (0.02)	0.77 (0.03)	0.56 (0.02)
50×50	0.65 (0.04)	0.60 (0.07)	0.69 (0.11)	0.64 (0.10)
25×25	0.55 (0.14)	0.45 (0.22)	0.46 (0.34)	1.29 (0.75)

表中 ( ) は健全メッシュとの濃度差

しかし、メッシュサイズが小さくなればなるほど、その面的広がり単木的なものに近づく。天然林の構造は複雑なもので、このような状況における濃度による健全性の識別は困難になる。また、ここで使用している写真の原縮尺は 1/20,000 で、これを 4 倍に引き伸ばし、これを用いて林分の分類を行なっている。このため、地上で 100 m×100 m のメッシュは、写真で

2 cm×2 cm に相当し、同様に 50 m×50 m のメッシュは 1 cm×1 cm、25 m×25 m は 0.5 cm×0.5 cm に相当する。林分の分類は立体視によるものであり、0.5 cm×0.5 cm のとき小区分ごとにこの分類を行なうことは、きわめて困難である。さらに、この種研究においては、写真上で分割されたメッシュを現地に転写し、それぞれのメッシュごとに地上調査を行なうことが必要である。このときメッシュが小さくなればなるほど、現地への転写に大きな誤差をとまない易くなる。

このようにして、林分像の濃度を用いて健全性の識別するためには、100 m×100 m のメッシュは大きすぎるし、また 25 m×25 m のメッシュは小さすぎるのがわかったので、50 m×50 m のメッシュサイズを用いることとした。

このメッシュは、研究対象地内にある三角点を基点として、東西および南北方向に基準線を書いて分割した。また、この作業は濃度測定に使用した原縮尺写真と、写真判読に使用した4倍伸し写真でなされたが、この後者は前者からの移写によるものである。

### 3. 地帯区分

写真上のメッシュを、立体視により、縮尺 1/5,000 の地形図に移写し、それぞれのメッシュごとに標高・斜面方位および傾斜度を測定した。

標高は、それぞれのメッシュにふくまれる等高線について、その最低値と最高値との平均をもって代表値とした。

また、斜面方位は、北・東・南および西向斜面の4方位に区分することとし、メッシュ内の面積的広がりが多い斜面方位をもって代表値とした。

さらに、傾斜度の測定はメッシュ内にふくまれる等高線の数を代表値としているが、メッシュの傾斜度は次式で与えられる<sup>85),94)</sup>。ただし、 $n$  は等高線の数、 $A$  は正方形のメッシュの1辺の長さ、および  $B$  は等高線間隔である。

$$\text{最大傾斜度 } \tan \theta = \frac{B}{A} n$$

$$\text{最低傾斜度 } \tan \theta = \frac{B}{\sqrt{2} A} n$$

したがって、ここでは  $A$  が 50 m、 $B$  が 10 m であるから、傾斜度は表-27 のようになる。国有林野の森林調査基準によれば、傾斜度 5° 未満が平坦、15° 未満が緩斜地、30° 未満が中斜地、および 30° 以上が急斜地である。ここではこの基準によることとしたので、メッシュ内にふくまれる等高線の数が、それぞれの 0 のときは平坦、1 のときは緩斜地、2 のときは中斜地、3 以上のときは急斜地とした。

表-27 等高線の数と傾斜度

等高線の数	傾斜度(度)		
	最大	最小	平均
1	11.3	8.0	9.7
2	21.8	16.2	19.0
3	31.0	22.8	26.9
4	38.7	29.7	34.2

#### 4. 林分分類

写真上に画かれているそれぞれのメッシュごとに、立体視により、従来から谷口ら<sup>6)</sup>が用いている表-28のような判読基準により、4倍伸し写真を用いインタープリントスコープによって林分の分類を行なった。

この場合、樹冠疎密度の測定は、筆者がこの研究のために作製した点格子板によっているが、これは写真上のメッシュの大きさと一致するように、1辺1cmの正方形の枠のなかに100箇の点が配列されたものである。

表-28 林分分類判読基準

区 分	林 分 の 内 容		
樹 冠 層	単 層 林 (I)	二 段 林 (II)	複 層 林 (III)
樹 種 群	針 葉 樹 林 (N) 全樹冠に対するNの樹冠占有面積 75% 以上	混 交 林 (M) 同 左 25%~74%	広 葉 樹 林 (L) 同 左 24% 以下
疎 密 度 級	密 林 (密) 林地面積に対する全樹冠占有面積 70% 以上	中 林 (中) 同 左 40%~69%	疎 林 (疎) 同 左 10%~39%
樹 高 級	(H <sub>3</sub> ) 上層木樹高 17 m 以上	(H <sub>2</sub> ) 同 左 9 m~16 m	(H <sub>1</sub> ) 同 左 8 m 以下

#### 5. 地上調査

不健全木の樹冠占有面積比率を知るためには、地上調査により、単木ごとにその健全性を把握しなければならない。このため、まず、総計595箇の全メッシュを、さきの林分分類の結果にもとづいて、林分型により層化し、各層ごとの抽出率が等しくなるように合計27箇のサンプルメッシュを任意に抽出した。これを標準地として、立体視により現地に転移し、地上調査を行なった。この標準地の大きさは0.2haである。調査内容は、単木ごとに樹種・胸高直径および健全性であり、あわせて下層植生の状況も調べた。健全性の評価は、第5章第1節の樹木の健全性の評価基準によっている。

さらに、標準地調査のほか、研究対象地全域にわたり、写真の立体視を併用して、地上の不健全木の位置を確認しつつこれを写真上に刺針し、各メッシュごとの健全性の把握が正確になるようにした。

#### 6. 健全性の評価

地上調査により写真上に刺針された不健全木について、立体視により、それらの樹冠占有面積比率を、林分分類における疎密度の決定の場合と同じ手法を用い、点格子板により測定し

た。これは、全樹冠内にふくまれる点数と、不健全木の樹冠内にふくまれる点数との比率によって、この比率により、本章第2節の林分の健全性の評価準基にもとづき、不健全木の樹冠占領面積比率が10%以下のものを健全林分、10%以上のものを不健全林分として、各メッシュごとの林分の健全性を評価した。

### 7. 濃度測定

濃度測定は、樹木の場合と同様に透過率によるもので、ネガフィルム上に画かれた2.5 mm × 2.5 mm のメッシュを1単位としている。この透過率の測定値  $T'$  により、ポジフィルムの透過率  $T$  を次式により求め

$$T = 1 - T'$$

これを濃度値に変換して解析に供した。また、この研究対象地域が撮影されている連続写真の枚数は10枚で、それぞれ隣り合う写真のオーバーラップは60%である。このため、図-12に示すように、それぞれの写真ごとに最大72箇のメッシュを測定し、周辺光量の違いによる影響を除去するようにした。このような濃度の測定は、樹木の場合と同様に、自動色彩計によって行っている。

### 8. 写真合成

写真合成の方法は、樹木の健全性の判別のために用いたものと全く同じである。この写真合成は、濃度測定を行なったすべての写真について行なうことが理想的である。しかし、第5章第5節第4項の樹木の色彩による判別で述べたように、すべて同一の色彩的画像条件をもつカラー写真をうることは現在のところ不可能である。このため、前第7項で述べた連続写真のなかから、この研究対象地のなかで、メッシュ数が最も多かった林分型 III M 中 H<sub>3</sub> がより数多く撮影されている写真を選んで合成した。この写真はコース5のナンバー6である。

### 9. 色度測定

樹木の場合と同様に、合成されたポジカラーフィルムを用い、各メッシュごとに色度を測定した。ここで使用した測定器機および測定サイズは、濃度測定の場合と同じである。

### 10. 識別効果の吟味

識別効果の吟味は、濃度および色彩を用い、樹木の場合と同様に判別関数により判別率を求め、この結果にもとづいて行なった。

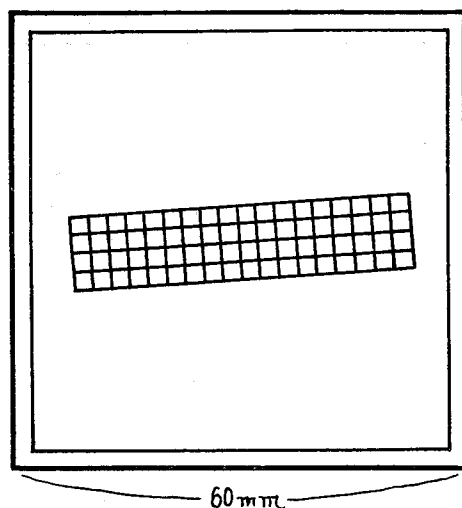


図-12 写真上の濃度測定箇所

## 第4節 研究の結果

## 1. 地上調査

地上調査の対象となった全メッシュ筒数は595筒で、その地帯別林分の内訳は、表-29および図-13~図-17に示してある。これによれば、地帯別では東向斜面が最も多く、ついで北向斜面、南向斜面の順となり、西向斜面が最も少なかった。また、林分別では、針広混交林分(M)が最も多く、ついで広葉樹林分(L)であり、これらに比して針葉樹林分(N)はきわめて少なかった。このうち、針広混交林分についてみると、とりわけIII M中H<sub>3</sub>が目立って多く、ついでIII M疎H<sub>3</sub>が多かったが、これらの林分は、いずれの斜面方位においても、多く認められているのが特徴的であった。このことは、この研究対象地が汎針広混交林帯に属していることによっている。

つぎに、表-30により、林分別の健全性をみると、広葉樹林分、針広混交林分および針葉樹林分の順に、それらにふくまれる不健全林分が多くなっているのが目立つ。このことは、筆者ら<sup>60)</sup>の調査によると、この地域がかつて1972年12月に大暴風雪に襲われ、その後虫害の大発生をみている。このような不健全木の発生は、トドマツ、エゾマツおよびアカエゾマツなどの針葉樹が被害をうけたことに起因している。

また、斜面方位別にみると、西向斜面では、その他の斜面方位に比べ不健全林分がとりわけ多いのが目立つ。このことは、西向斜面が、この地域の北西部に多く、しかもここでは

表-29 地帯別林分別メッシュ筒数

地帯区分 林分	北向斜面		東向斜面		南向斜面		西向斜面		計	
	メッシュ筒数	百分率 (%)	メッシュ筒数	百分率 (%)	メッシュ筒数	百分率 (%)	メッシュ筒数	百分率 (%)	メッシュ筒数	百分率 (%)
III N 中 H <sub>3</sub>					1	0.9	2	3.4	3	0.5
III N 疎 H <sub>3</sub>	1	0.6	1	0.4			6	10.1	8	1.4
N 計	1	0.6	1	0.4	1	0.9	8	13.5	11	1.9
III M 密 H <sub>3</sub>	11	6.4	12	4.7	10	9.0	7	11.9	40	6.7
III M 中 H <sub>3</sub>	76	44.2	100	39.5	70	63.1	21	35.6	267	44.9
III M 疎 H <sub>3</sub>	28	16.3	76	30.1	13	11.7	14	23.7	131	22.0
M 計	115	66.9	188	74.3	93	83.8	42	71.2	438	73.6
III L 密 H <sub>3</sub>	1	0.6	2	0.8	5	4.5			8	1.3
III L 中 H <sub>3</sub>	39	22.6	34	13.4	11	9.9	7	11.9	91	15.3
III L 疎 H <sub>3</sub>	16	9.3	28	11.1	1	0.9	2	3.4	47	7.9
L 疎	56	32.5	64	25.3	17	15.3	9	15.3	146	24.5
合計	172	100.0	253	100.0	111	100.0	59	100.0	595	100.0

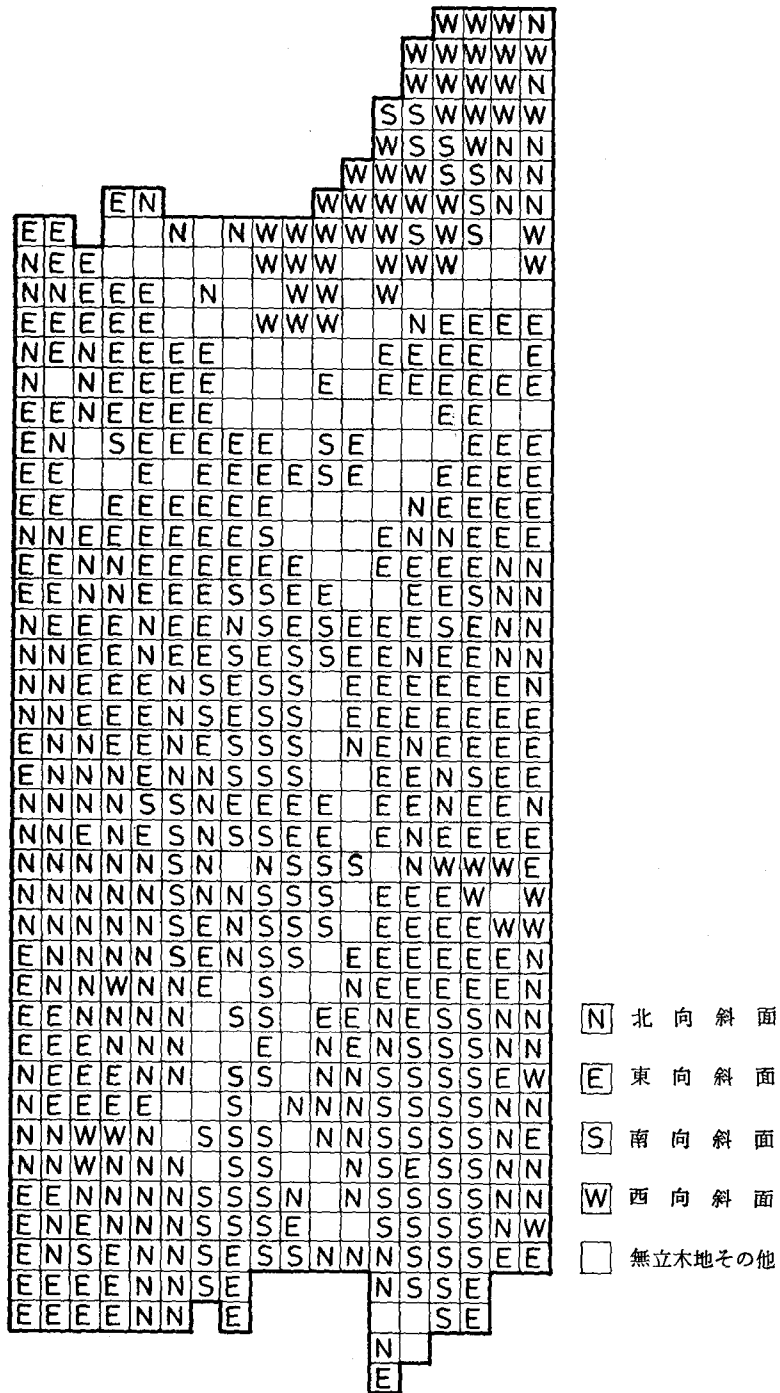


図-13 地帯区分一覽

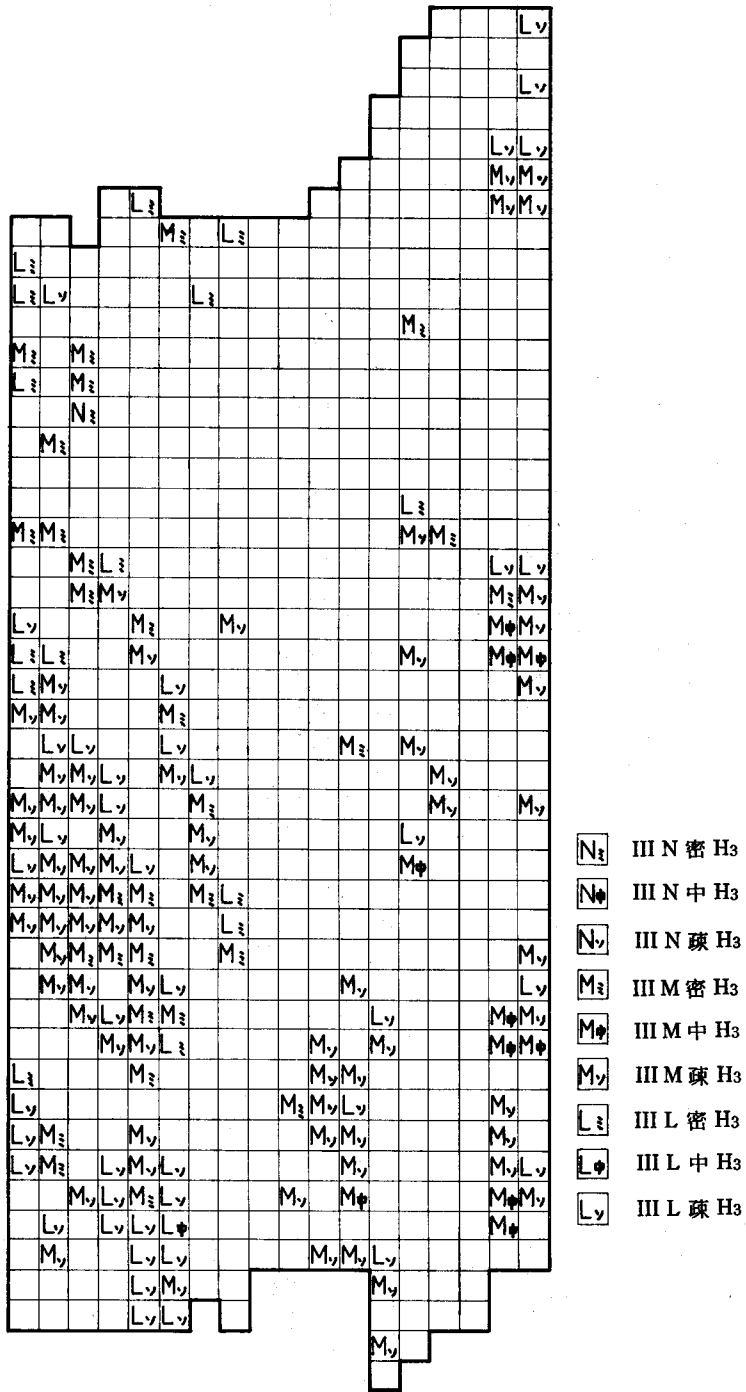
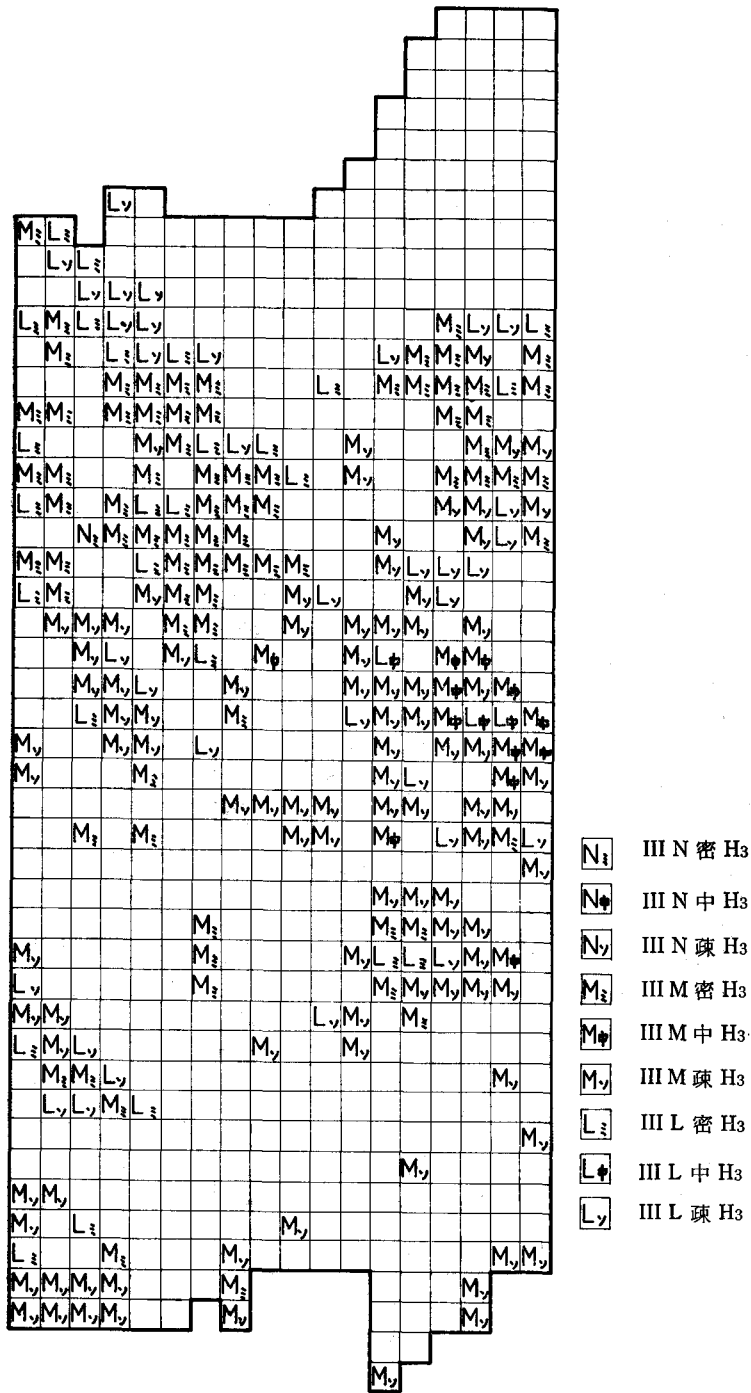


図-14 林分分類一覽 (北向斜面)



圖—15 林分分類一覽 (東向斜面)

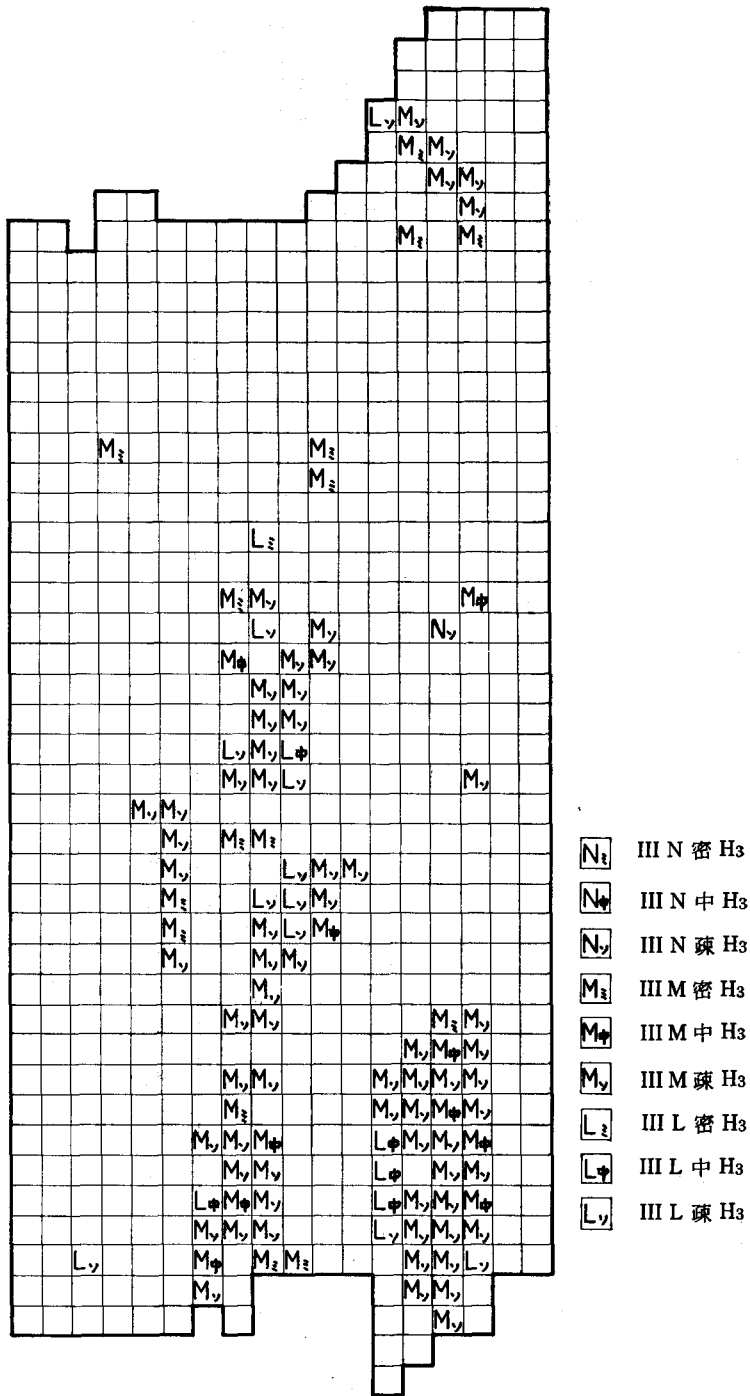


図-16 林分分類一覧 (南向斜面)

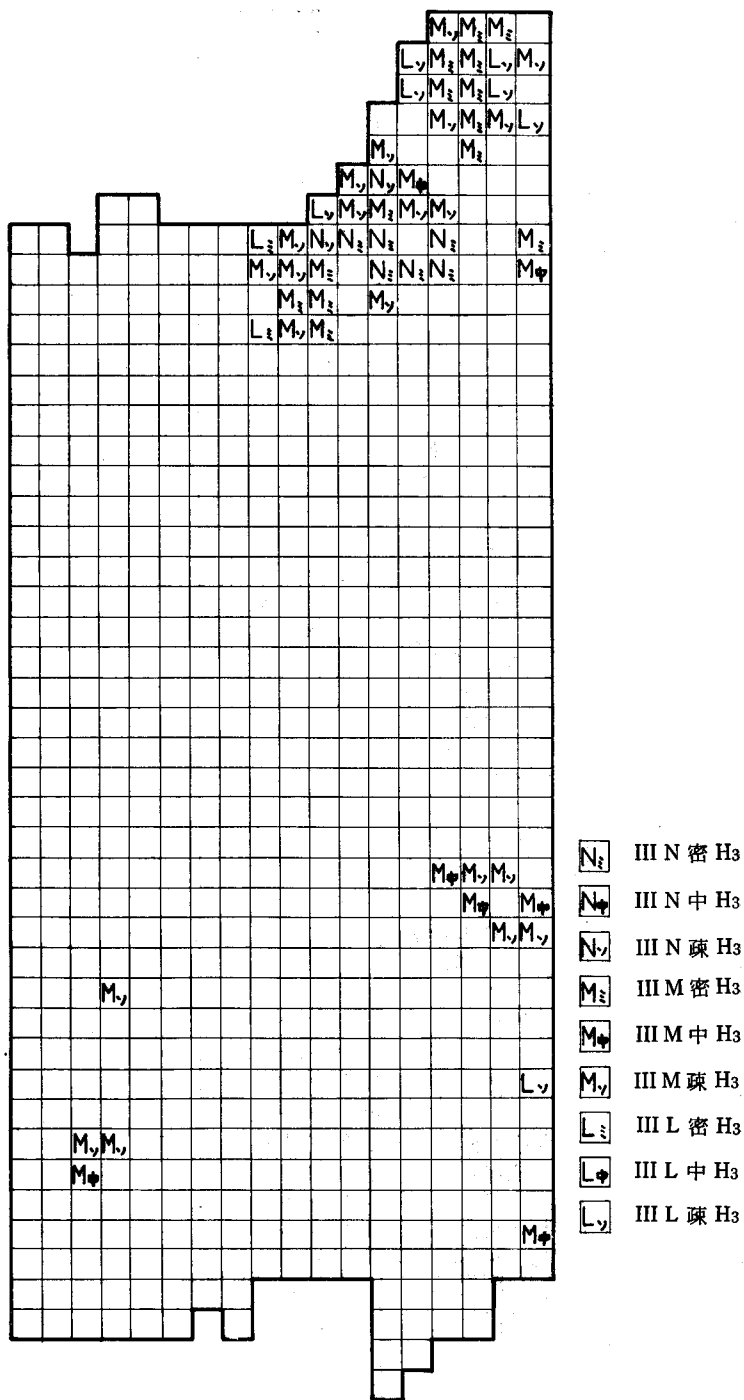


図-17 林分分類一覽 (西向斜面)

表-30 地帯別林分別健全林分・不健全林分メッシュ箇数

林 分	北向斜面		東向斜面		南向斜面		西向斜面		計			
	健全 林分	不健全 林分	健全 林分	不健全 林分	健全 林分	不健全 林分	健全 林分	不健全 林分	健全林分		不健全林分	
									メッシュ 箇数	百分率 (%)	メッシュ 箇数	百分率 (%)
III N 中 H <sub>3</sub>					1		1	1	2	66.7	1	33.3
III N 疎 H <sub>3</sub>	1			1			2	4	3	37.5	5	62.5
N 計	1			1	1		3	5	5	45.5	6	54.5
III M 密 H <sub>3</sub>	11		11	1	10		6	1	38	95.0	2	5.0
III M 中 H <sub>3</sub>	60	16	76	24	55	15	17	4	208	77.9	59	22.1
III M 疎 H <sub>3</sub>	20	8	64	12	12	1	8	6	104	79.4	27	20.6
M 計	91	24	151	37	77	16	31	11	350	79.9	88	20.1
III L 密 H <sub>3</sub>	1		2		5				8	100.0		
III L 中 H <sub>3</sub>	31	8	34		11		5	2	81	89.0	10	11.0
III L 疎 H <sub>3</sub>	16		27	1	1		1	1	45	95.7	2	4.3
L 計	48	8	63	1	17		6	3	134	91.8	12	8.2
合 計	140	32	214	39	95	16	40	19	489	82.2	106	17.8
評価区分別 百分率 (%)	81.4	18.6	84.6	15.4	85.6	14.4	67.8	32.2				

老齡過熱のエゾマツ・アカエゾマツの大径木が多くみられ、上記のような被害をとくに集中的にうけたことによる (図-18 参照)。

## 2. 濃度による判別

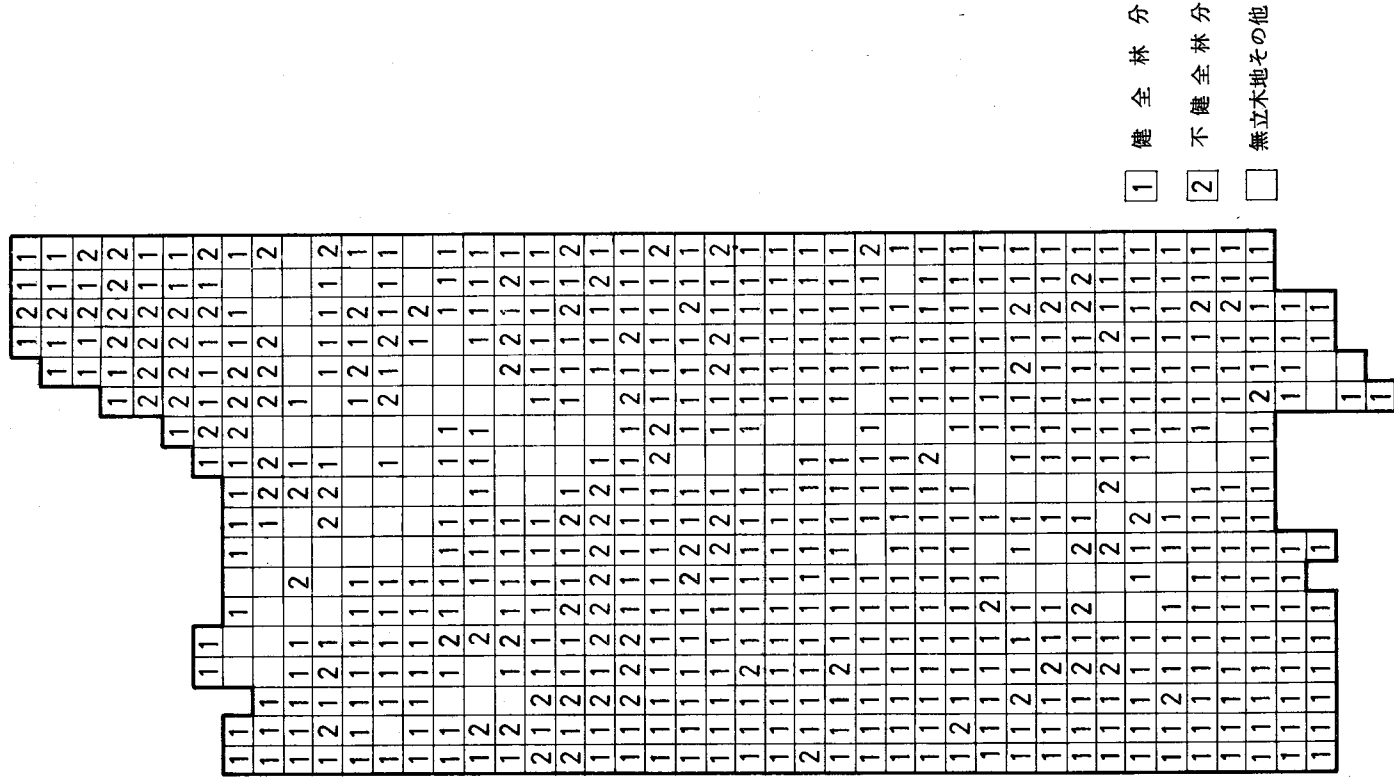
バンド別濃度特性を知るため、本論の第5章第5節第2項では、単バンドごとの判別率によったが、ここでもこの方法にもとづいて吟味を行なった。

これに先立ち、地帯別林分別メッシュ箇数に関し、濃度による適正抽出箇数を次式によって求めた。ただし、 $n$ は抽出箇数、 $e$ は目標精度、 $c$ は変異係数であり、ここでは $e$ を15%、 $t$ を1.96とした。

$$n \geq \left( \frac{tc}{e} \right)^2$$

この結果、地帯別林分別に20箇以上、さらに健全性の区分ごとに4箇以上が必要であることがわかった。このため、前掲表-29および表-30により、判別率による判別効果の吟味が可能な林分として、北向および東向斜面では、III M 中 H<sub>3</sub> および III M 疎 H<sub>3</sub>、南向斜面および西向斜面では、III M 中 H<sub>3</sub> をそれぞれとりあげた。

ここで、標高および傾斜度による区分をとりあげなかったことは、この研究対象地域では本章第3節第3項で述べた標高および傾斜度の各クラスごとに、濃度による有意な差を認めら



図一18 林分の健全性の評価一覧(地上調査による)

表-31 バンド別判別結果

林分	III M 中 H <sub>3</sub>												III M 疎 H <sub>3</sub>								平均判別率 (%)									
	北向斜面				東向斜面				南向斜面				西向斜面				北向斜面					東向斜面								
バンド別	地上調査結果		判別結果		判別率 (%)	地上調査結果		判別結果		判別率 (%)	地上調査結果		判別結果		判別率 (%)	地上調査結果		判別結果		判別率 (%)	地上調査結果		判別結果		判別率 (%)					
	評価区分	メッシュ筒数	健全林分	不健全林分		メッシュ筒数	健全林分	不健全林分	メッシュ筒数		健全林分	不健全林分	メッシュ筒数	健全林分		不健全林分	メッシュ筒数	健全林分	不健全林分		メッシュ筒数	健全林分	不健全林分	メッシュ筒数		健全林分	不健全林分	メッシュ筒数	健全林分	不健全林分
R	健全林分	60	43	17	67.1	健全林分	76			51.4	健全林分	55	28	27	47.6	健全林分	17	8	9	60.7	健全林分	20	12	8	78.9	健全林分	64	56	8	50.95
	不健全林分	16	8	8		不健全林分	24				不健全林分	15	7	8		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	3	5		不健全林分	12	8	4	
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76			
B	健全林分	60	48	12	73.7	健全林分	76	69	7	81.0	健全林分	55	42	13	71.4	健全林分	17			78.6	健全林分	20	16	4	50.78	健全林分	64			50.78
	不健全林分	16	8	8		不健全林分	24	12	12		不健全林分	15	7	8		不健全林分	4				不健全林分	8	2	6		不健全林分	12			
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76			
G	健全林分	60			62.0	健全林分	76	50	16	67.1	健全林分	55	39	16	52.4	健全林分	20			80.3	健全林分	64	57	7	43.63					
	不健全林分	16				不健全林分	24	12	12		不健全林分	15	7	8		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8				不健全林分	12	8	4	
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76			
IR	健全林分	60	32	28	52.6	健全林分	76	38	38	50.0	健全林分				60.7	健全林分	20	11	9	50.0	健全林分	64	31	33	35.55					
	不健全林分	16	8	8		不健全林分	24	12	12		不健全林分					不健全林分	8	2	6		不健全林分	12	5	7						
	計	76				計	100				計	21				計	28				計	76								

表-32 2バンドの組合わせによる判別結果

林分	Ⅲ M 中 H <sub>3</sub>												Ⅲ M 疎 H <sub>3</sub>												平均判別率 (%)						
	北向斜面				東向斜面				南向斜面				西向斜面				北向斜面				東向斜面										
	地上調査結果		判別結果		地上調査結果		判別結果		地上調査結果		判別結果		地上調査結果		判別結果		地上調査結果		判別結果		地上調査結果		判別結果								
バンド別組合わせ	評価区分	メッシュ数	メッシュ数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ数	メッシュ数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ数	メッシュ数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ数	メッシュ数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ数	メッシュ数		判別率 (%)						
			健全	不健全				健全	不健全				健全	不健全				健全	不健全				健全	不健全		健全	不健全	健全	不健全		
B×R	健全林分	60	41	19	68.4	健全林分	76	54	22	71.0	健全林分	55	38	17	71.4	健全林分	17	10	7	57.1	健全林分	20	16	4	85.7	健全林分	64	47	17	67.1	70.12
	不健全林分	16	5	11		不健全林分	24	7	17		不健全林分	15	3	12		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	0	8		不健全林分	12	8	4		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				
R×IR	健全林分	60	46	14	76.3	健全林分	76	46	30	60.0	健全林分	55	39	16	68.6	健全林分	17	10	7	57.1	健全林分	20	18	2	89.3	健全林分	64	44	20	67.1	69.73
	不健全林分	16	4	12		不健全林分	24	10	14		不健全林分	15	6	9		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	1	7		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				
G×R	健全林分	60	40	20	67.1	健全林分	76	56	20	76.0	健全林分	55	37	18	67.1	健全林分	17	8	9	47.6	健全林分	20	17	3	85.7	健全林分	64	48	14	72.4	69.32
	不健全林分	16	5	11		不健全林分	24	4	20		不健全林分	15	5	10		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	1	7		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				
B×IR	健全林分	60	45	15	76.3	健全林分	76	54	22	71.0	健全林分	55	38	17	68.6	健全林分	17	9	8	57.1	健全林分	20	16	4	78.6	健全林分	64	37	27	57.9	68.25
	不健全林分	16	3	13		不健全林分	24	7	17		不健全林分	15	5	10		不健全林分	4	1	3		不健全林分	8	2	6		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	72				
G×IR	健全林分	60	45	15	76.3	健全林分	76	48	28	62.0	健全林分	55	37	18	67.1	健全林分	17	9	8	57.1	健全林分	20	14	6	75.0	健全林分	64	37	27	57.9	65.90
	不健全林分	16	3	13		不健全林分	24	8	16		不健全林分	15	5	10		不健全林分	4	1	3		不健全林分	8	1	7		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				
B×G	健全林分	60	36	24	60.5	健全林分	76	47	29	62.0	健全林分	55	44	11	80.0	健全林分	17	9	8	52.4	健全林分	20	16	4	78.6	健全林分	64	37	27	59.2	65.45
	不健全林分	16	6	10		不健全林分	24	9	15		不健全林分	15	3	12		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	2	6		不健全林分	12	4	8		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				

表-33 3バンドおよび4バンドの組合わせによる判別結果

林分	III M 中 H <sub>3</sub>														III M 疎 H <sub>3</sub>										平均判別率 (%)						
	北向斜面					東向斜面					南向斜面					西向斜面					北向斜面					東向斜面					
	地上調査結果		判別結果			地上調査結果		判別結果			地上調査結果		判別結果			地上調査結果		判別結果			地上調査結果		判別結果			地上調査結果		判別結果			
	評価区分	メッシュ筒数	メッシュ筒数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ筒数	メッシュ筒数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ筒数	メッシュ筒数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ筒数	メッシュ筒数		判別率 (%)	評価区分	メッシュ筒数	メッシュ筒数			判別率 (%)	評価区分	メッシュ筒数	メッシュ筒数		判別率 (%)
健全			不全	健全				不全	健全				不全	健全				不全	健全				不全	健全	不全				健全	不全	
B×G×R	健全林分	60	46	14	76.3	健全林分	76	57	19	76.0	健全林分	55	44	11	80.0	健全林分	17	10	7	57.1	健全林分	20	16	4	85.7	健全林分	64	46	18	72.4	
	不健全林分	16	4	12		不健全林分	24	5	19		不健全林分	15	3	12		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	0	8		不健全林分	12	3	9		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				計
G×R×IR	健全林分	60	44	16	76.3	健全林分	76	58	18	76.0	健全林分	55	37	18	67.1	健全林分	17	9	8	57.1	健全林分	20	18	2	89.3	健全林分	64	48	14	72.4	
	不健全林分	16	2	14		不健全林分	24	6	18		不健全林分	15	5	10		不健全林分	4	1	3		不健全林分	8	1	7		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				計
B×R×IR	健全林分	60	45	15	76.3	健全林分	76	54	22	71.0	健全林分	55	38	17	71.4	健全林分	17	9	8	57.1	健全林分	20	17	3	89.3	健全林分	64	44	20	67.1	
	不健全林分	16	3	13		不健全林分	24	7	17		不健全林分	15	3	12		不健全林分	4	1	3		不健全林分	8	0	8		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				計
B×G×IR	健全林分	60	46	14	76.3	健全林分	76	47	29	62.0	健全林分	55	49	6	85.7	健全林分	17	9	8	52.4	健全林分	20	17	3	85.7	健全林分	64	37	27	57.9	
	不健全林分	16	4	12		不健全林分	24	9	15		不健全林分	15	4	11		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	1	7		不健全林分	12	5	7		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				計
B×G×R×IR	健全林分	60	45	15	76.3	健全林分	76	57	19	76.0	健全林分	55	48	7	85.7	健全林分	17	10	7	57.1	健全林分	20	17	3	85.7	健全林分	64	45	19	71.1	
	不健全林分	16	3	13		不健全林分	24	5	19		不健全林分	15	3	12		不健全林分	4	2	2		不健全林分	8	1	7		不健全林分	12	3	9		
	計	76				計	100				計	70				計	21				計	28				計	76				計

れなかったことによる。

#### A. 単バンドによる判別

B, G, R および IR の 4 バンドにつき、その判別率を求めたものが、表-31 である。この場合、航空写真の実際的な利用の立場からすれば、すべての地帯別林分が各写真ごとに数多く出現するため、ある限られた地帯別林分における判別率が高くても、すべての地帯別林分をとおして総体的に判別率の高いものが、判別効果の高い写真であると考えらるべきである。このため、ここでは平均判別率にもとづいて検討することとした。

そこで、前掲表-31 によれば、単バンドでは、いずれのバンドにおいても、総体的に判別効果は十分であるとはいえない。しかし、これらのなかにあつて、R バンドおよび B バンドが、G および IR バンドに比べ、比較的高い判別率をえたことに注目すべきである。とくに IR バンドの判別率がとりわけ低かったことに注目しなければならない。このことは、第 5 章第 5 節の結果と同様、ここでも江森<sup>81)</sup>らによって行なわれた結果と一致している。天然林におけるこの種判別においても、やはり R バンドが IR バンドより遙かに効果的であることを知った。

#### B. 2 バンドの組合わせによる判別

単バンドによる判別の効果は、前記したように総体的に高いものであるとはいえない。このため、2 つ以上のバンド別組合わせにより、より一層の判別効果を期待した。まず、2 バンドの組合わせによる判別率を求めてみたが、この結果は表-32 のとおりである。

これによれば、総体的に単バンドの場合に比べ、判別率が増大していることがわかる。そして、これらの組合わせのなかで最も判別率が高かったものは、B×R であり、ついで R×IR, G×R, B×IR, B×G, および G×IR の順となっている。ここで、R バンドをふくむ組合わせが、いずれも上位を占めていることに注目しなければならない。このことは、第 5 章第 5 節の結果でもそうであったように、R バンドによるこの種判別効果が明確に立証された。

#### C. 3 バンドの組合わせによる判別

3 バンドの組合わせによる判別率は、表-33 に示されている。これによれば、これらの判別率は 2 バンドの組合わせによるものよりさらに増大している。そして、これらの組合わせのなかで、最も判別率の高かったものは B×G×R であり、ついで G×R×IR, B×R×IR および B×G×IR の順となっている。このように、ここでも、2 バンドの組合わせによる場合と同様、R バンドをふくむ組合わせがより効果的であることが知られた。とりわけ、B×G×R の組合わせによる効果が高かったことは、第 5 章第 5 節で述べた結果と一致するものである。

#### D. 4 バンドの組合わせによる判別

4 バンドの組合わせによる判別率は、前掲表-33 に示されている。これによれば、これまで吟味してきた、単バンド、2 バンド、および 3 バンドの組合わせによるものの判別率と比べ

ると、最も高い値がえられた。しかし、3バンドの組合わせのうちの  $B \times G \times R$  の判別率と、ほとんど差がなかった。

### E. ま と め

これまで、単バンドおよび2バンド以上の組合わせによる11通りのものによる、判別効果を吟味してきたが、これらの結果についてつぎのようにまとめることができる。

まず、天然林の健全性の識別について、バンド別組合わせの数が多いほど判別効果が高くなる傾向が認められる。そして、このなかにおいて、 $B \times G \times R$  の組合わせによる効果が、 $B \times G \times R \times IR$  の組合わせによるものと、ほとんど近似しているのが特徴的である。

さらに重要なことは、2バンド以上の組合わせによる判別効果において、そこにRバンドをふくむ組合わせが、より高い判別効果をえたことである。このことは、第5章第5節の結果でも述べたように、この種判別に最も有効なものは、Rバンドであることを立証したものである。

また、一方これらの結果を、第5章第5節の結果と比べると、その単バンドおよび2バンド以上の組合わせによる判別率において、それが濃度のみによる場合には、天然林におけるものの方が総体的に高い値を示している。そして、第5章第5節で述べた、濃度と樹冠断面積および樹高との組合わせによるものに近似した値を示している。このことは、天然林におけるこの種識別において、樹冠断面積や樹高要素にもとづく林分分類の効果が立証されたものであることを強調しておきたい。

### 3. 色彩による判別

前項では、2バンド以上の組合わせについて、濃度による健全性の判別効果を吟味した。この吟味は第5章第5節の樹木の健全性の判別で述べたように、数理的に導きだされた判別率によっている。したがって、これらの組合わせによっていかなる画像がえられるか、また、この画像を用いて実際的に健全性を識別できる否かの検討がなされなければならない。このため、ここでは、樹木の場合と同様にカラー写真を合成し、これを用いて健全性の判別効果を吟味した。

この吟味に先立ち、さきの11通りの組合わせのうち、比較的判別効果の高かった4通りの3バンドによる組合わせを選び、カラー写真を合成した。これらの組合わせは、 $B \times G \times R$ 、 $B \times G \times IR$ 、 $B \times R \times IR$  および  $G \times R \times IR$  であり、それぞれの組合わせにおいて、バンド別写真ごとに与えた色光は、表-34に示されている。そして、これによってえられた合成カラー写真は、図版 VI-1~図版 VI-4 である。

また、ここでの吟味は、濃度による吟味を行なった III M 中  $H_3$ 、および III M 疎  $H_3$  を対

表-34 バンド別写真ごとに与えた色光

バンド別組合わせ	バンド別			
	B	G	R	IR
$B \times G \times R$	青	緑	赤	
$G \times R \times IR$		青	緑	赤
$B \times G \times IR$	青	緑		赤
$B \times R \times IR$	青		緑	赤

表-35 地帯別林分メッシュ筒数

林分	地帯区分				計
	北向斜面	東向斜面	南向斜面	西向斜面	
III M 密 H <sub>3</sub>	4	9		4	17
III M 中 H <sub>3</sub>	38	49	26	5	118
III M 疎 H <sub>3</sub>	12	11	4		27
III L 密 H <sub>3</sub>		1	1		2
III L 中 H <sub>3</sub>	13	9	7		29
III L 疎 H <sub>3</sub>	3	3			6
合計	70	82	38	9	199

象としている。ここで用いた写真は、コース5、ナンバー6であり、この写真の地帯別林分のメッシュ筒数は、表-35に示してある。これによって、III M 中 H<sub>3</sub>の北向、東向および南向斜面以外の、それぞれの斜面方位別のメッシュ筒数をみると、いずれも出現筒数が少なかったため、ここではIII M 中 H<sub>3</sub>の北向、東向および南向斜面について、判別効果を吟味した。これらの林分における地帯別健全林分および不健全林分のメッシュ筒数は、表-36に示してある。

さらに、ここで合成されたカラー写真による判別効果の吟味は、樹木の場合と同様に、メッシュごとの色度をCIE 1960 UCS座標値として求め、これによってすすめた。

この結果は、表-37に示されている。これによれば、総体的に、この種の判別に最も効果的な組み合わせは、B×G×Rであり、ついでB×R×IR、G×R×IRの順となり、最も低かったものは、B×G×IRであった。これは、第5章の樹木の場合と全く同じ結果であることを示している。

表-36 地帯別健全林分、不健全林分メッシュ筒数 (III M 中 H<sub>3</sub>)

評価区分	地帯区分(斜面方位)		
	北向	東向	南向
健全林分	30	37	20
不健全林分	8	12	6
計	38	49	26

表-37 色彩による判別結果(%)

Table 37. Identification result of color photograph (%)

Band combination	Slope bearing			Mean discriminant ratio
	Nouthern slope	Eastern slope	Southern slope	
B×G×R	71.1	77.6	80.8	76.50
B×G×IR	73.7	65.3	80.8	73.27
B×R×IR	76.3	71.4	76.9	74.87
G×R×IR	76.3	77.6	69.2	74.37

### 第5節 天然林の健全性の識別に関するまとめ

航空写真により、天然林の健全性を知るためにマルチスペクトル写真を用いて、B, G, R および IR の4バンドについて濃度特性を把握し、これにもとづいて、この種識別に最も効果的なバンド別写真の組み合わせを探ろうとした。

この結果、これらの4バンドの写真について、それぞれのバンド別濃度特性を、健全林分および不健全林分の判別率によって吟味した。これによると、R および B バンドが、G および IR バンドに比べ、比較的高い判別率をえたことに注目すべきである。とりわけ、IR バンドの判別率が低かったが、これは樹木の判別の場合と同様の結果となった。このことは、この種識別において、その対象が樹木であれまた天然林であれ、R バンドがきわめて効果的であることを意味している。

つぎに、2バンド以上の組み合わせによる識別効果を見ると、単バンドによる場合よりもその効果が高い。しかも、バンド別組み合わせの数が増すほど、効果が高くなることが認められた。このことは、樹木の健全性の識別における結果と同じである。また、ここで、R バンドをふくむ組み合わせが、いずれも、それがふくまれていない組み合わせよりも高かったことが注目される。このことは、R バンドが、この種識別にきわめて高い効果を示したものであり、特筆されてよい。このことはさらに、樹木の健全性の識別の場合と同じく、江森<sup>21)</sup>らが述べていることを明らかに立証したものである。

さらに、色彩による識別効果について、3バンドの組み合わせによる4種類の合成カラー写真を用いて吟味した結果、最も効果的であったものはB×G×Rであり、ここでも樹木の健全性の識別の場合と同様の結果がえられた。

以上のように、濃度および色彩による識別について、その効果を吟味してきたが、ここで地帯区分および林分分類を行なわなければ、どのような結果をうるかについて検討した。これは、濃度によるバンド別組み合わせのなかにあつて、最も効果的であったB×G×R×IRを選ん で吟味したものである。この結果は、表-38に示すように、これによる判別率は、地帯区分および林分分類を行なったものに比べ、きわめて低い値を示した。このことは、きわめて重要なことであり、この種識別における地帯区分および林分分類の必要性を、明らかに立証しえた

表-38 地帯区分・林分分類なしの判別結果 (B×G×R×IR)

地上調査結果	メッシュ筒数	濃度による判別結果		判別率 (%)
		健全林分のメッシュ筒数	不健全林分のメッシュ筒数	
健全林分	489	291	198	59.7
不健全林分	106	42	64	
計	595			

ものであるといてよい。

## 第7章 結 論

北海道の森林は、本州のそれと異なり、その大部分が天然林によって占められている。しかも、これらの多くは、地利的条件に恵まれない奥地林である。したがって、このような天然林の調査にあたって、従来から航空写真の利用が重視されてきた。しかし、これまでの利用は森林の蓄積・生長量などの量的構成要素の把握に中心がおかれていた。1970年代に入り、森林の公益的機能が再認識されるにいたり、樹種・健全性などの質的なものの把握が重視されるようになった。

とはいうものの、現段階においては、街路樹や公園樹など比較的限られた立地環境におけるものの健全性を把握する方法を、そのまま森林に応用しようとする傾向が認められる。北海道の天然林は、複雑な林木構成をもち、しかも多様な土地条件のもとで生育していることに留意しなければならない。

ここで筆者は、天然林の健全性を知るために、マルチスペクトル写真およびこれによって合成されたカラー写真を用い、その濃度や色彩がもつ特性を、地形的特徴や林木構成に関連させて把握することからはじめた。そして、この結果にもとづき健全性の識別を自動化していく方法論の提示を、この研究の主たる目的とした。

この研究をすすめるため、まず、植栽木を対象とした基礎的研究を行ない、この結果を天然林に敷衍してその健全性を把握しようとするものである。

このような基礎的研究をすすめるにあたり、第1に基本的かつ重要なことは、健全性の評価方法である。これは、地上調査によって行なわれるが、この評価基準は十分に客観性をもったものでなければならないし、また、この研究の成果をより発展させるためには、一般林業技術者が容易に評価しうるものであることがのぞましい。

ここで筆者は、単木ごとに、その樹冠上部に認められる現象を、樹葉の変色・梢頭の枯損・枯枝の有無および葉量の4要素について調べ、いずれの要素についても全く異常が認められなかったものを健全木、その他を不健全木と規定した。この規定は、J. E. COLWELLの指摘にもある、写真上の樹木像は樹冠部の映像であるという事実に基づいている。樹木は、生理的なものであれ、また物理的なものであれ、何らかの内的および外的要因によって、その生育を阻害された場合、樹冠や幹および枝などに異常が認められる。しかし、航空写真による場合は、樹冠上部に認められた現象だけが、判断のよりどころとならざるをえない。したがって前記の筆者の基準が、現時点においては比較的妥当性をもち、かつ容易に評価しうるものであり、これを強調しておきたい。そこで筆者は、単木ごとに評価された健全木および不健全木について、写真の濃度や色彩による判別の可能性と、その識別効果を吟味した。

これによると、この研究に供した、46年生のドイツトウヒ、47年生のトドマツについて、

共通していえることは、B, G, R および IR の4バンドのうち、最も効果的であったものは、R バンドである。ついで B バンドがよく、これらに比して G および IR バンドは効果が低かった。この結果は、さきに筆者ら<sup>14)</sup>が行なった実験や、江森ら<sup>81)</sup>による反射エネルギーの測定結果と同じであった。とりわけ、IR バンドについて、それがこの種の判別に効果的でなかったことに注目しなければならない。従来、江森ら<sup>81)</sup>は、終始 R バンドの効果を主張してきたが、ここでの結果は、それを立証するものであった。

つぎに、2バンド以上の組み合わせについてみると、いずれの樹種も総体的に、バンド別組み合わせの数が増すほど判別効果が高くなる傾向が認められた。そして、これらの組み合わせのうち、両樹種に共通していえることは、2バンドの組み合わせであれ、また3バンドの組み合わせであれ、R バンドがふくまれる組み合わせによる判別効果が高かったこと、そして、それに B バンドが加わることにより、さらに効果が向上したことを強調したい。このことは、バンド別の判別効果において、R バンドが4バンドのうちとりわけ効果的であったこと、および B バンドがそれについて高かったことによるもので当然の帰着といえる。一方、G および IR バンドは、これらを組み合わせることによって判別効果の向上が認められず、このうち G バンドはむしろ相殺的效果をもたらしていたことに注目しなければならない。

以上の結果、ドイツウヒでは、最も判別効果が高かったものは、 $B \times G \times R \times IR$  で、ついで  $B \times R \times IR$ ,  $G \times R \times IR$  および  $R \times IR$  の順であり、これらの判別率は、いずれも近似した値を示し 71~72% であり、その他の組み合わせによる判別率は、70% 以下であった。また、トドマツでは、最も高かったものは  $B \times G \times R$  であり、ついで  $B \times G \times R \times IR$ ,  $B \times R$  および  $B \times R \times IR$  の順であった。しかし、これらの判別率は、ドイツウヒのそれに比べ、いずれも 70% 以下の値を示していた。

ここで、判別率の内訳をみると、いずれの樹種においても、地上調査で健全木と評価されたものが、濃度によって正しく判別された割合は比較的高かったものの、一方、地上で不健全木と評価されたものが、正しくそのように判別された割合が健全木の場合に比べやや低かった。このため、濃度を用いることによるのみ健全性を把握することは、いささか危険である。

そこで筆者は、濃度に樹冠断面積や樹高要素を付加することによって、判別効果を高めることができるものと考え、これについて検討を行なった。この結果、いずれの樹種も、樹冠断面積および樹高の要素のうち、いずれか1つを付加するだけで、濃度のみによる判別率よりも 7~17% 判別率が上り、しかもその内訳をみると、これも濃度のみによる場合より良好な結果をえた。そして、ここで注目すべきことは、R バンドに上記のような手法を加えてえられた判別率は、2バンド以上の組み合わせに同様の手法を加えてえられたものと、ほとんど近似した値を示したことである。ここで、樹冠断面積および樹高、とりわけこの前者は、航空写真から容易に判読しうる要素である。したがって、樹木の健全性を知るためには、R バンドの濃度に樹

冠断面積の要素を付加するだけで、その目的を達成しうることを、強調したい。

そして、さらに重要なことは、天然林の健全性を濃度により判別しようとする場合、樹冠断面積および樹高をよりどころとして、林分分類を行なえば、判別効果をより高めうる可能性があることである。

これまで、濃度による健全性の判別について述べてきたが、この結果濃度のみで比較的判別効果の高かったバンド別組合わせのなかから、5通りの組合わせを選び、この組合わせごとにカラー写真を合成した。そして、この写真の色彩によって、健全性の判別効果を吟味したところ、両樹種について、 $B \times G \times R$  および  $B \times R \times IR$  の2通りの組合わせが、最も効果的であった。そして、いずれの樹種においても、 $B \times G \times R$  の組合わせによる写真(リアルカラー写真)では、一般に樹木は緑色であらわされるが、このうち不健全木はより赤みがかかった緑色であらわされ、枯死したものは赤色を呈する。そして、これらを肉眼視により明らかに区分することができた。同様に  $B \times R \times IR$  の組合わせによる写真では、一般に樹木は赤紫色で表わされるが、このうち不健全木は、青みがかかった赤紫色であらわされ、枯死したものは青白色を呈する。そして、これらを肉眼視により明らかに区分することができた。

ここで筆者は、以上の結果から、実際的な写真利用の立場から、単写真としてのリアルカラー写真によっても、樹木の健全性の識別をなしうるものであることを知ることができた。

つぎに、以上のような植栽木による健全性の識別に関する基礎的研究の結果を敷衍して、天然林の健全性の識別を行なった。ここで、天然林がもつ林木構成の複雑性、およびそれが生育している多様な地形的条件を考えたとき、単木ごとにその健全性を把握することは困難である。したがって、林分を単位としてその健全性を把握することにした。

この把握に先立って、処理しておかなければならない諸条件が、基礎的研究の結果えられている。それらは、濃度を健全性のみ収斂させるための役割だけでなく、識別効果をより向上させるために、きわめて役立つものである。これらは、地形的特徴とりわけ斜面方位による地帯区分であり、また、林分分類そのものと深くかかわりをもっている。

これらの諸条件をはじめとして、とくに濃度や色度の測定を容易ならしめるため、ここではメッシュ法を採用し、この研究対象地を分割することからはじめた。この場合、まずメッシュの大きさやその形状を決定することが重要かくべからざるものの1つである。このことについて、筆者はまえもってモデル実験を行なった結果、1メッシュが  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  (面積  $0.25 \text{ ha}$ ) の正方形とすることが、最も適切であることを理論的に探究し、これを採用することとした。

健全性の評価も、同様に1メッシュごとに行なっている。この評価基準は、メッシュ内の樹冠占領面積合計に対する、不健全木の樹冠占領面積比率によった。そして、この比率が10%以下のものを健全林分、10%以上のものを不健全林分とした。このことは、北海道の天然林にあっては、通常  $\text{ha}$  当り材積に対する不健全木の材積比率が、10%程度認められている<sup>50),51)</sup> ことによっている。しかも、筆者が行なった調査結果によれば、 $\text{ha}$  当りの不健全木の材積比率

と、同じくその樹冠占領面積との間には、0.98という高い相関が認められている。

そこで筆者は、メッシュごとに評価された健全林分および不健全林分について、樹木の場合と同様に、濃度や色彩による判別の可能性と、その判別効果を吟味した。それによると、B, G, R および IR の4バンドのうち、最も効果的であったものは、R バンドである。ついで B バンドがよく、これらに比して G および IR バンドの効果が低かった。この結果は、江森<sup>81)</sup>らが指摘している、この種判別における R バンドの効果を傍証するものである。

2 バンド以上の組み合わせについてみると、ここでも樹木の健全性の識別の場合と同様に、バンド別組み合わせの数が増すほど、判別効果が高くなる傾向が認められた。そしてまた、2 バンドの組み合わせであれ、3 バンドの組み合わせであれ、R バンドがふくまれる組み合わせによる判別効果が高かった。このことは、バンド別判別効果において、R バンドが4 バンドのうちとりわけ効果的であったことによるもので、ここで強調しておきたい。

そして、最も判別効果が高かった組み合わせは、 $B \times G \times R \times IR$  で、ついで  $B \times G \times R$  であったが、これらはいずれもその判別率が75%をこえている。また、判別率が70%をこえるものは、上記2通りの組み合わせをふくめて、11通りの組み合わせうち7通りの組み合わせに認められた。そしてこの結果は、第5章第5節において、樹木の濃度に樹冠断面積や樹高要素を組み合わせてえられた結果とほぼ近似している。このことは、この研究において地帯区分や林分分類を行なった効果を如実に示したものである。したがって、ここでこの種識別における地帯区分や林分分類の必要性を強調しなければならない。

これまで、濃度による健全性の判別について述べてきたが、この結果、濃度のみで比較的判別効果が高かったバンド別組み合わせのなかから、3バンドの組み合わせによる4通りを選び、この組み合わせごとにカラー写真を合成した。そして、これらの写真の色彩によって、健全性の判別効果を吟味したところ、 $B \times G \times R$  の組み合わせによるものが、最も効果的であることがわかった。また、 $B \times G \times R$  の組み合わせによるカラー写真(リアルカラー写真)では、不健全な林分ほど、赤みがかった緑色の樹冠による斑点が数多く認められることで、肉眼視により明らかに区分することができた。このようなことから、筆者はここでも、実際的な写真利用の立場から、単写真としてのリアルカラー写真によって、林分の健全性を効果的に識別しうることを知ることができた。

以上のような、樹木および天然林の健全性の識別に関する吟味の結果、筆者は、この研究の所期の目的である天然林の健全性の識別方法、および識別の自動化への途を探究するという課題を一応達成しえたものと確信している。筆者はここで、このような成果をもたらした主たる理論的根拠として、つぎのような事項を指摘しうる。

その第1は、健全性の評価基準が、妥当性をもち、森林の健全性を解析するうえで、効果的な処理をなしえた。第2は、森林の健全性を評すための地上調査も、この基準にしたがい、航空写真の立体視を併用しながら、広範囲にわたってなしえた。第3に、森林の健全性を

濃度や色彩に直接関連させる前処理を、地帯区分や林分分類などによってなしえた。第4は、メッシュ法を採用し、このメッシュを、モデル実験の結果にもとづき、森林の健全性を敏感に反映させうる大きさとした。第5には、マルチスペクトル写真を用いて、各バンド別写真の濃度特性を森林の健全性に関連させて把握し、この種識別に適するバンド別組合わせを求めた。そして、第6に、濃度による判別効果の吟味が、数理的に導きだされたものであるため、ここで良好な結果えたいいくつかのバンド別組合わせを選び、実際的にカラー写真を合成して、森林の健全性が識別されうる応用性を求めたことなどである。

つぎに、この研究の成果について、これを実際的に応用することの可能性は高いと考えているが、このことに関連して、なおいくつかの残された問題点がある。その第1は、濃度や色彩の測定である。判別の自動化をすすめるためには、これが必要条件である。このためには適正な精度をもった測定器機類が要求される。その第2は、林分分類が写真の立体視によるものであるため、熟練度の高い判読者が要求されるし、第3には航空写真の撮影方式にかかわる問題があげられる。そして第4には、判別関数の適用にかかわる問題がある。

これらのうち、第1の課題については、近年この種の測定器機類の開発が急速にすすめられており、近い将来より安価でかつ操作の容易なものが開発されることを期待する。

第2の課題については、林業における航空写真の利用拡大のためには、欠くことのできないことであり、従来からこの種判読者の養成が重視されているところであり、将来多くの判読者が養成される可能性を十分もっている。

第3の課題について、この研究の結果、単木を単位とする健全性の識別に関しては、Rバンド写真の濃度と樹冠断面積によって十分な効果を期待できることがわかった。また、天然林の健全性の識別においても、単写真としてのリアルカラー写真の利用に期待できることがわかったので、この種の識別のためにのみ、多額の経費を投入して、広大な地域に分布する天然林の全域にわたり、マルチスペクトル・イメージ方式による写真撮影を行なう必要はない。

第4の課題について、この研究では、<sup>2</sup>地帯区分とりわけ斜面方位別に、分類された林分ごとに、判別関数を作成して処理しえた。筆者は、この判別関数を、北海道の天然林とくに北部の森林を対象にその適用の大であることを期待している。林分分類の基準は、谷口・板垣および筆者らによって、従来から北海道の天然林、とりわけ北部の森林を対象に適用してきた。そして、この分類の手法は、森林施業計画のための森林調査に十分にその応用効果が立証され、現在なお利用されている。したがって、筆者の判別関数を、このような林分分類の結果と重ね合わせることによって、その適用効果を大いに期待しうるものである。

#### 引用および参考文献

- 1) 谷口信一：森林航測論，講義資料，1971.
- 2) 中島 巖：森林航測概要，地球出版，1961.
- 3) 渡辺恵一郎：写真計測，共立出版，1976.

- 4) 吉田正男：改訂理論森林経理学, p. 133, 1950.
- 5) 井上由扶：森林経理学, p. 37, 地球社, 1974.
- 6) 菱沼勇之・助谷口信一ほか：林分の分類とその作業法の予察(第3報), 日林北支講, 18号, p. 19, 1969.
- 7) 中島 巖：空中写真利用による森林調査法に関する研究, 林試報告, No. 251, p. 146, 1973.
- 8) 長 正道：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, No. 48, p. 114, 1974.
- 9) 高橋教夫：航空写真による樹種の識別に関する研究, 北大演報, 36巻, 1号, 1976.
- 10) 大金永治・板垣恒夫：デジタルカラー写真によるトドマツ造林地の地位判定, 第83回日林講, p. 92, 1972.
- 11) 渡辺 宏：デジタルカラー映像解析装置の森林航測への活用, 森林航測, No. 107, p. 21, 1975.
- 12) 板垣恒夫：デジタルカラー写真による林相判読, 第85回日林講, p. 41, 1974.
- 13) 菱沼勇之助・谷口信一：マルチスペクトル写真の濃度と樹木の生育状況, 第86回日林講, p. 86, 1975.
- 14) 菱沼勇之助・谷口信一：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, No. 107, p. 16, 1975.
- 15) 渡辺 宏：マルチバンド映像濃度と樹木活力, 日本写真測量学会昭50年度学術講演会発表論文集, 1975.
- 16) 小野雅司：森林活力調査—奥定山溪地区における実施について, その1, 林野時報, Vol. 22, No. 3, 1975.
- 17) 小野雅司：森林活力調査—奥定山溪地区における実施について, その2, 林野時報, Vol. 22, No. 4, 1975.
- 18) 江森康文・安田嘉純：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, Vol. 12, No. 3, 1973.
- 19) 板垣恒夫：森林航測の発展について, 日林北支講, 19号, p. 13, 1970.
- 20) 鏡木徳二：林業上飛行機写真の利用, 北海道林業会報, 23巻, 1号, p. 21, 1925.
- 21) 板井秀夫：航空写真による樺太森林調査に就いて, 日林会誌, 17巻, 6号, p. 457, 1935.
- 22) 竹内孫次：満州国の森林航空調査に就いて, 日林春季大会講, p. 285, 1938.
- 23) 鈴木西雄：満州帝國に於ける森林航空写真の現況, 日林春季大会講, p. 265, 1938.
- 24) 原 忠平・中曾根武夫：航空写真に依る森林の材積計算の1例, 日林春季大会講, p. 435, 1941.
- 25) 中山博一：航空写真による森林調査, 興林会, 1937.
- 26) 堀江友義：林業経営における航空写真利用の研究, 林業技術, No. 141, p. 12, 1953.
- 27) 仰木重蔵：林業と航空写真, 林業技術, No. 159, p. 125, 1955.
- 28) 木梨謙吉：推計学を基とした測樹学, 朝倉書店, 1954.
- 29) 鷲尾良司：日本資本主義と森林資源問題, 林業経済研究会報, No. 87, p. 31, 1975.
- 30) 林野庁編：航空写真による森林調査, 1955.
- 31) 片岡秀夫：近代的森林調査法の実際, 1959.
- 32) 大友栄松ほか：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), 林試報告, No. 114, p. 1, 1959.
- 33) Shin-ichi Taniguchi; Forest Inventory by Aerial Photographs, 北大演報, 21巻, 1号, p. 1, 1961.
- 34) 谷口信一：航空写真による林木蓄積の査定法, 北方林業叢書, 15, 1960.
- 35) 木梨謙吉・長 正道：航空写真による九州大学宮崎演習林(広葉樹)の蓄積推定, 第71回日林講, p. 62, 1961.
- 36) 木梨謙吉：航空写真材積推定の精度, 第71回日林講, p. 59, 1961.
- 37) 大島誠一：航空写真による林木蓄積の査定における精度についての一考察, 第71回日林講, p. 67, 1961.
- 38) 谷口信一：間寒別川流域の森林経営の保全に関する研究—間寒別川流域森林の推計学的研究, 北大演業務資料, 4, p. 23, 1962.
- 39) 中島 巖ほか：林型の相違による航空写真像の濃度測定と解析法の研究, 林試報告, No. 141, p. 31, 1962.

- 40) 丸安隆和・西尾元充：天然色写真に関する研究，土木学会論文集，第60号，p. 1, 1959.
- 41) 丸安隆和・西尾元充：赤外線写真とその応用について，土木学会誌，No. 44, 1959.
- 42) 木梨謙吉ほか：航空写真による九州大学宮崎演習林（広葉樹天然林）の蓄積推定，第76回日林講，p. 70, 1965.
- 43) 高田和彦：空中写真利用阿賀野川経営計画区資源調査についての2, 3の検討，第76回日林講，p. 66, 1965.
- 44) 中島 巖ほか：航空写真による林相区分図の作成と材積調査法の研究，林試報告，No. 146, p. 33, 1965.
- 45) 長 正道：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，No. 48, 1974.
- 46) 中島 巖：写真情報による森林の数量解析，写真測量，No. 9, p. 2, 1970.
- 47) 谷口信一：北海道における森林航測の課題と方法，測量，9月号，1971.
- 48) 菱沼勇之助・谷口信一ほか：林分の分類とその作業法の予察（第1報），日林北支講，No. 18, p. 15, 1969.
- 49) 菱沼勇之助・谷口信一ほか：林分の分類とその作業法の予察（第2報），日林北支講，18号，p. 19, 1969.
- 50) 北海道林務部：物満内天然林の解析と施業法，1970.
- 51) 北海道林務部：浦幌経営区天然林の解析，1975.
- 52) 高橋教夫・谷口信一・菱沼勇之助ほか：赤外線の濃度と林分構造，日林北支講，22号，p. 7, 1973.
- 53) 科学技術庁資源調査会：高密度地域における資源利用と環境保全の調和，1973.
- 54) 横浜市緑政局：横浜市緑地の環境診断調査報告書，1974.
- 55) 森 忠次・服部 進：赤外カラー写真の測色による緑被地の分離法，写真測量とリモートセンシング，Vol. 15, No. 2, p. 9, 1976.
- 56) 伊藤 忠：赤外カラーによる樹木活力のパターン化，環境情報科学，Vol. 5, No. 1, p. 64, 1976.
- 57) 日本林業技術協会開発部：赤外カラー写真と植物，森林航測，No. 107, 1975.
- 58) 高橋教夫・谷口信一：マルチスペクトル写真における樹種の濃度測定，第86回日林講，p. 80, 1975.
- 59) 荒木春視：環境調査とマルチスペクトル写真，写真測量とリモートセンシング，Vol. 14, No. 3, 1975.
- 60) 板垣恒夫・菱沼勇之助・谷口信一：航空写真による虫害木の判読，第87回日林講，p. 71, 1976.
- 61) 渡辺 宏：樹力活力の考え方と空中写真の利用，林業技術，No. 399, p. 15, 1975.
- 62) 菱沼勇之助・谷口信一：天然林の林分型および生育状況とマルチスペクトル画像の濃度，第87回日林講，p. 73, 1976.
- 63) 日本林業技術協会：マルチスペクトル森林活力調査報告書，1976.
- 64) 谷口信一・大金永治ほか：航空写真によるトドマツ人工林の蓄積推定，日林北支講，22号，1973.
- 65) 水谷栄一・鈴木 隆：デジタルカラー写真に利用した間伐計画，日林北支講，23号，1974.
- 66) 谷口信一・板垣恒夫・菱沼勇之助：マルチスペクトル・イメージ方式による森林解析の基礎的研究—マルチスペクトル写真のデジタルカラー解析，日林北支講，23号，p. 30, 1974.
- 67) Braun Blanquet (鈴木時夫訳)：植物社会学 (I)，1971.
- 68) P. A. MURTHA: A Guide to Air Photos Interpretation of Forest Damage in Canada, Canadian Forestry Service, Publication No. 1292, 1972.
- 69) L. E. PHIPTTS: IR Color for Crop Disease Identification, Photogrammetric Engineering, p. 1116, No. 11, 1969.
- 70) F. P. WEBER: Remote Sensing to Detect Stress in Forests, Photogrammetric Engineering, p. 163, No. 2, 1972.
- 71) 松野久也ほか：リモートセンシング概説，宇宙・高空・地上におけるリモートセンシング技術の研究開発と応用，p. 43, キヤノン，1974.
- 72) 久保田宏ほか：光学技術ハンドブック，p. 463, 朝倉書店，1975.
- 73) J. E. COLWELL: Basic Matter and Energy Relationships Involved in Remote Reconnaissance, Photogrammetric Engineering, Vol. 29, No. 5, 1963.
- 74) 福原道一：土壌のリモートセンシング，宇宙・高空・地上におけるリモートセンシング技術の研究開発と応用，p. 165, キヤノン，1974.

- 75) 土屋 清: 気象のリモートセンシング, 宇宙・高空・地上におけるリモートセンシング技術の研究開発と応用, p. 261, キャノン, 1974.
- 76) 安田嘉純: リモートセンシングに有効な放射波長帯領域, 画像技術, p. 35, 1975.
- 77) D. M. GATES, H. J. KEEGEN, J. C. Schleter and V. R. WEIDRIER: Spectral Properties of Plants, Applied Optics, No. 4, 11, 1965.
- 78) H. W. GAUSMANN: Leaf Reflectance of Near-infrared, Photogrammetric Engineering, p. 183, Vol. 40, No. 2, 1974.
- 79) И. А. Шульгин (内嶋善兵衛訳): 太陽と植物, 東大出版会, 1970.
- 80) 高畑 滋: 植物の反射スペクトル特性について, 写真測量, p. 13, Vol. 11, No. 4, 1972.
- 81) 江森康文・安田嘉純: フィールドにおける分光反射測定, 宇宙・高空・地上におけるリモートセンシング技術の研究開発と応用, p. 297, キャノン, 1974.
- 82) Committee on Remote Sensing for Agricultural Purposes: Remote Sensing with Spectral Reference to Agriculture and Forestry, National Academy of Sciences, 1970.
- 83) E. B. KNIPPING: Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation, Journal of Remote Sensing of Environment, p. 155, Vol. 1, 1970.
- 84) 玖村敦彦ほか: 物質の交換と輸送, 植物生理学講座, p. 165, 朝倉書店, 1974.
- 85) 山田昌一: 微細地形に関する森林立地学的研究, p. 158, 林野共済会, 1955.
- 86) 板垣恒夫・菱沼勇之助: 急傾斜地における写真濃度の測定例, 北方林業, p. 24, No. 315, 1975.
- 87) 中村賢太郎: 育林学, 金原出版, 1969.
- 88) 林 知己夫ほか: 情報処理と統計数理, 産業図書, 1969.
- 89) 三宅一郎ほか: SPSS 統計パッケージ (II), 解析編, 東洋経済, 1976.
- 90) C. E. OLSON: Grass Canopy Bidirectional Spectral Reflectance, Proceeding of the 9th Symposium on Remote Sensing of Environment, p. 1061, Vol. 2, 1974.
- 91) R. H. HAYNES and P. C. HANAWALT (三浦謙一郎, 大井龍夫訳): 放射エネルギーと生命の起源—分子進化—, 東京化学同人, 1974.
- 92) 谷口信一ほか: 航空写真による樹種の判読について, 日林北支講, 17号, p. 40, 1968.
- 93) J. E. COLWELL: Vegetation Canopy Reflectance: Journal of Remote Sensing of Environment, p. 175, Vol. 3, 1974.
- 94) 中野尊正・吉川虎雄: 地形調査法, 古今書院, 1951.

### Summary

In order to achieve various purposes such as timber production, preservation of flood and hillside erosions, recreations and others, the development of forest land as a natural resource has been an urgent social requirement, therefore, it is absolutely necessary to understand the forest content in terms of both quantitative and qualitative constructions.

Accordingly, to begin with, the author tried to do research works aimed at finding out some suitable conditions for fulfilling such requirements by aerial photographs. Thus, the effective identification method directly concerned with the stand vigorous in natural forest was established by the combination of both automatic photodensity measurement and photo-interpretation.

This paper consist of seven chapters as follows:

1. Introduction
2. Purpose and method for this study
3. History of study

4. Conception of tree vigorous grade
5. Identification of vigorous grade concerned with individual tree
6. Identification of stand vigorous grade
7. Conclusion

1. Introduction; The present situation concerned with Japanese forest inventory by aerial photograph was described approximately by the author.

2. Purpose and method for this study; It was pointed out in this Chapter that an identification of stand vigorous grade would accomplish a significant function for establishing the working plan. Moreover, the procedure of this study is as follows;

- 1) Field research
- 2) Aerial photography by multi-spectral camera
- 3) Classification of the forest land by the topographic feature
- 4) Stand classification
- 5) decision of classification unit
- 6) Statistical analysis

3. History of study; The author approximately summarized a large number of studies by aerial photographs carried out for the identification of individual tree vigorous grade. These studies have been carried out to estimate vigorous grade individual tree growing on restricted area such as park or street. Accordingly, the author indicated that the result of these studies could not be applied directly to the forest to be investigated.

4. Conception of tree vigorous grade; Depending upon the essential idea that most of tree images on aerial photographs are obviously represented by tree crown image, the author defined that the tree vigorous grade could be determined by external appearances at the upper part of the tree crown.

5. Identification of vigorous grade concerned with individual tree; Throughout the result obtained by various studies being done in the past time, it is well known that an energy of electric reflectance of tree leaves alters in accordance with tree growth conditions and has a significant influence on the photodensity. Thus, the author concluded that the most suitable combination of spectral bands should be obtained by investigating an effective spectral band. Furthermore, the author establish the discriminant function depending upon various factors such as photodensity, color, tree height and crown basal area and separated vigor and nonvigor respectively.

Among single bands, effectiveness of R band was the highest and reached to 66.4 percent (Refer to Table 7, 8, 14 and 15). While expecting much more efficiency depending upon special characteristics of individual band, further research work was carried out by the author in terms of band combination. As a result, the combination of B band and R band was effective carrying out this sort of identification.

It was ascertained sufficiently that such a result was entirely equivalent to both Emori's theory and the author's model experimental work in which dead and vigor seedling was separated clearly each other.

Furthermore, in the connection with R band and seven kind of combinations, these identification efficiencies were examined respectively from the viewpoint of relationship between photodensity and the following factors such as tree height, crown basal area, the combination

of tree height and crown basal area. Thus, these efficiencies reached as far as 80 percent. Among combined color photographs, B×G×R indicated the highest effectiveness amounting to 83.3 percent (Refer to Table 23 and 24).

6. Identification of stand vigorous grade; This Chapter occupies the most important part in this paper, the author described precisely in the connection with the method of applying result obtained in the previous Chapter to the identification of stand vigorous grade. Especially, since stand-classification and territory zoning directly promoted the relationship between photodensity or color and stand vigorous grade, an efficiency of the identification increased remarkably. The ratio of the non-vigorous crown basal area to the whole crown one was the most adequate factor identifying the content of forest stands. Throughout such a process, the author concluded that the forest should be divided into two stands such as vigorous and non-vigorous ones.

Especially, the author newly adopted mesh method and ascertained that the size of mesh (50 m×50 m) delicately expressed the photodensity of non-vigorous stand in such an investigation. Furthermore, the whole area was divided into this mesh size.

Thus, among single bands, the effectiveness of R band was the highest and reached to 50.9 percent, on the other hand, among band combinations, the effectiveness of B×G×R was the highest and reached to 74.5 percent. Moreover, the author developed color photograph by band combination and examined as identification effectiveness. As a result, the combination of B and R band, especially, B×G×R indicated the highest effectiveness amounting to 76.5 percent (Refer to Table 37).

7. Conclusion; Throughout the result of analysis obtained by multispectral photographs, the author emphasized the real color and panchromatic films with red filter should be utilized for identifying the vigorous grade of both individual tree and forest stand.

Finally, author's procedure of identifying stand vigorous grade is as follows;

Procedure of identifying  
stand vigorous grade

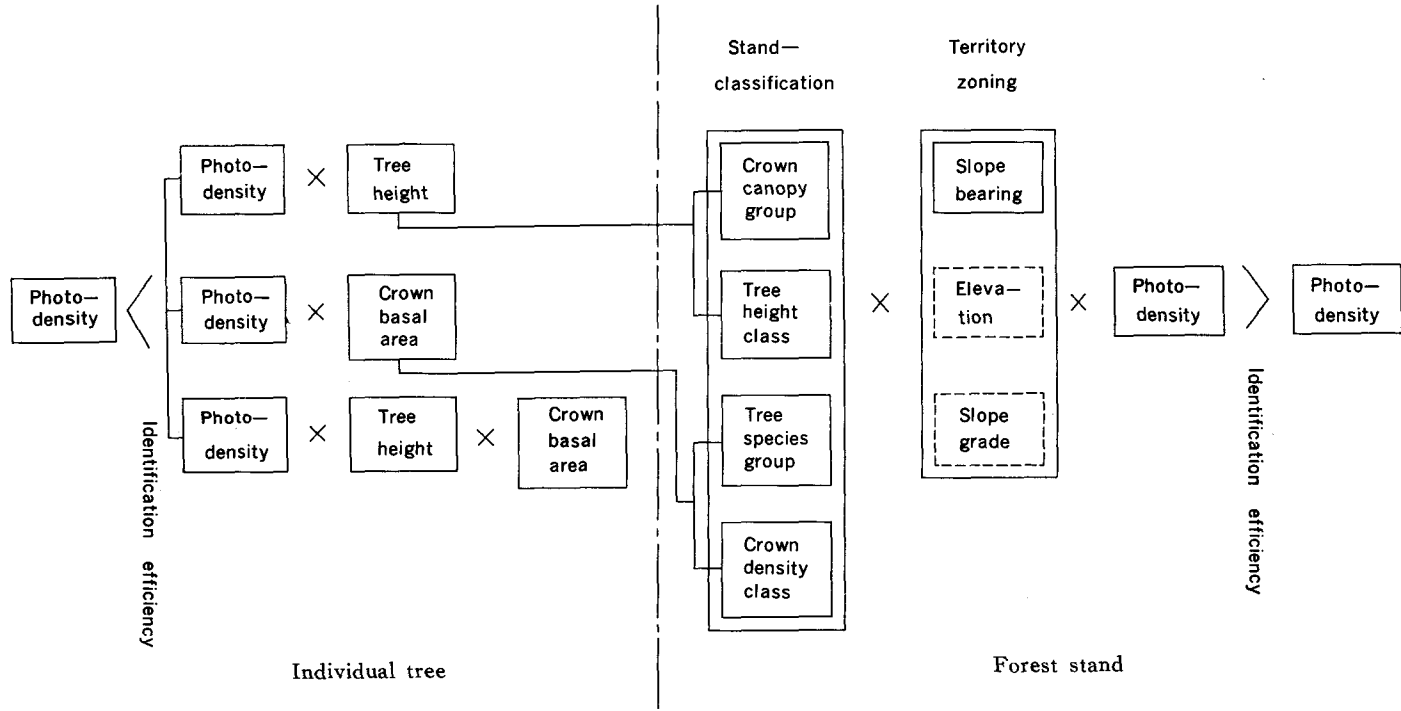




写真 1-1 B バンド (ドイツウヒ)



写真 1-2 G バンド (ドイツウヒ)



写真 1-3 R バンド (ドイツウヒ)



写真 1-4 IR バンド (ドイツウヒ)



写真 2-1 Bバンド (トドマツ)

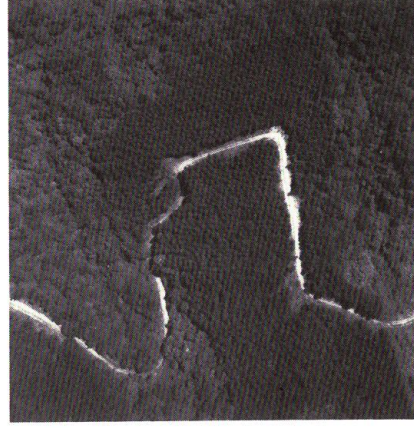


写真 2-2 Gバンド (トドマツ)

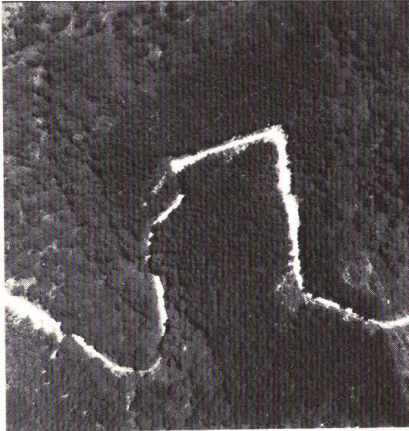


写真 2-3 Rバンド (トドマツ)

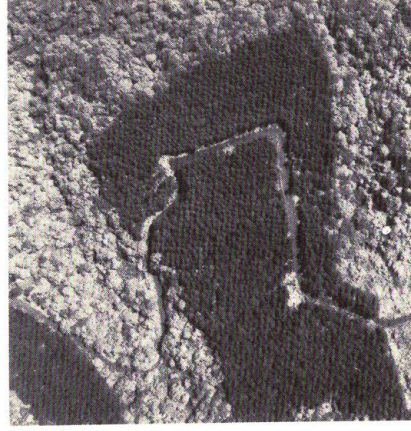


写真 2-4 IRバンド (トドマツ)



写真 3-1 B×G×R (ドイツウヒ)

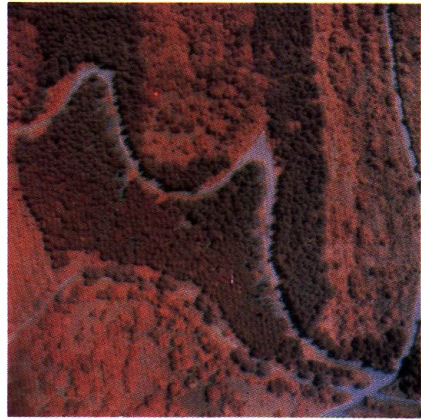


写真 3-2 B×R×IR (ドイツウヒ)

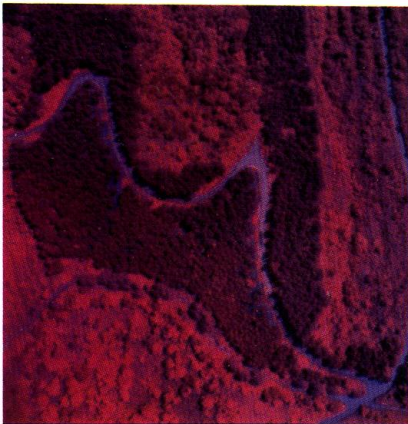


写真 3-3 R×IR (ドイツウヒ)

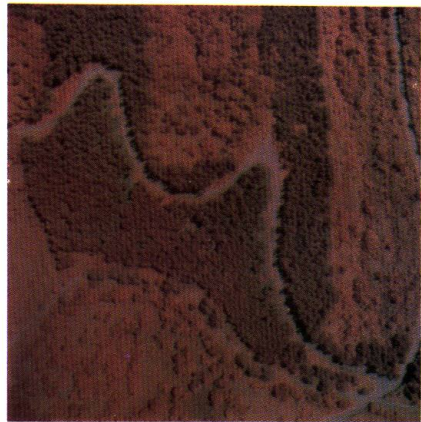


写真 3-4 G×R×IR (ドイツウヒ)

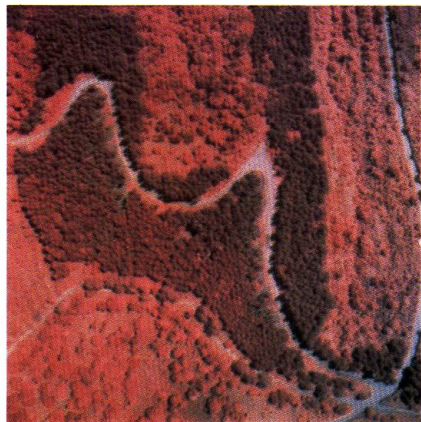


写真 3-5 B×G×IR (ドイツウヒ)

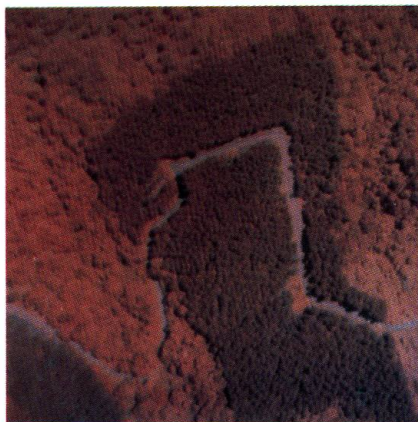


写真 4-1 B×R×IR (トドマツ)



写真 4-2 B×G×R (トドマツ)

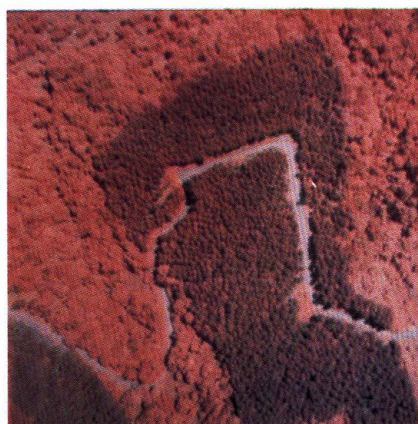


写真 4-3 G×R×IR (トドマツ)

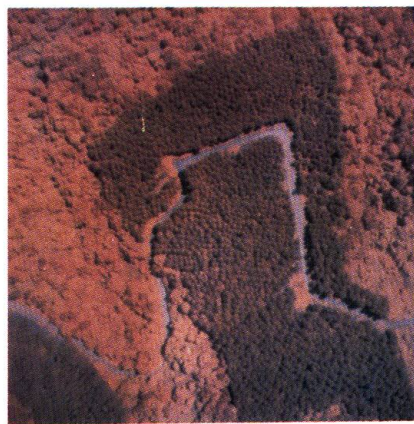


写真 4-4 B×G×IR (トドマツ)

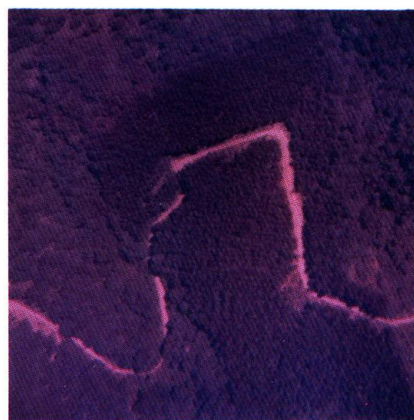


写真 4-5 B×R (トドマツ)



写真 5-1 Bバンド (天然林)



写真 5-2 Gバンド (天然林)



写真 5-3 Rバンド (天然林)



写真 5-4 IRバンド (天然林)



写真 6-1 B×G×R (天然林)



写真 6-2 B×R×IR (天然林)

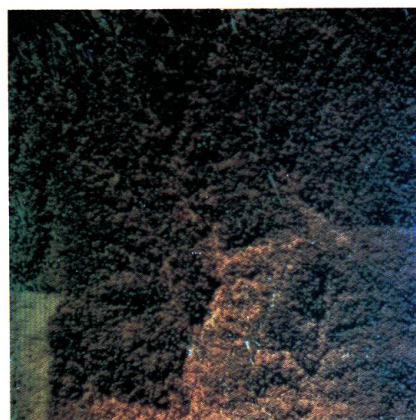


写真 6-3 G×R×IR (天然林)

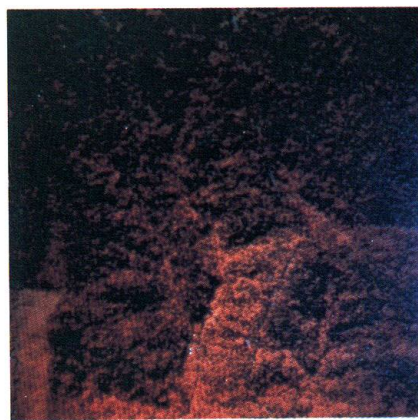


写真 6-4 B×G×IR (天然林)