ランドサット TM データによる立山付近の林相分類と その分布に及ぼす気温と消雪時期の影響

加藤 千菜美* 野上 道男**

Air Temperature and Snowcover as Factors Controlling Distribution of Forest Zone in the Central High Mountains, Japan

Chinami KATO* and Michio NOGAMI**

Abstract

It is the purpose of this paper to clarify relationship between forest distribution and its controlling factors such as cumulative air-temperature (degree-day), landform characteristics and snow-cover duration using remote sensing images, DEM (Digital Elevation Model) and climatological data. The outline of procedure of investigation will be described below.

The spring, summer and autumn LANDSAT TM/MSS images were used to analyze seasonal change of vegetation and snow-cover. At first all images were converted into images resampled on a 56/58 m grid of DEM by using the nearest neighborhood method. Then the image data were processed in order to eliminate shadows caused only by azimuth and dip of each grid of DEM and direction of sunbeam. This processing is useful to improve the accuracy of landcover classification for a high relief mountainous region like this study area, the northernmost part of the Hida Range, Central Japan. Finally five categories; dwarf pine, evergreen coniferous forests, deciduous broad-leaved forests, alpine meadow, bare grounds were interpreted, and a digital map of the estimated date of snow disappearance was obtained from the multi-temporal images.

Air-temperature for each pixel of the DEM was calculated using daily surface air-temperature at a local AMeDAS station (Automated Meteorological Data Acquisition System) and daily lapse rate in free air at the nearest aerological observatory. The estimated values were tested comparing the values observed at temporal observatories of mountain huts during summer season. The cumulative air-temperature is defined as an integrated excess of 5°C of daily air temperature, and it is widely admitted that it controls primarily the distribution of forest plants in rainy Japanese Islands. The other controlling factors such as snow-cover duration and slope azimuth and dip were discussed statistically.

In conclusion;

(1) Dwarf pine (*Pinus pumila*) is distributed in gentle and westward slopes of ridge zones with the maximum occupation ratio at ca. 2,500 m. This is replaced by alpine meadows or bare grounds in and around snow patches durable to late spring or summer.

* 日本ユニシス CAD/CAM システム二部 * Nihon Unisys

** 東京都立大学理学部地理学教室 ** Department of Geography, Tokyo Metropolitan University

(2) Evergreen coniferous (*Abies mariesii*, *A. veitchii*, *Tsuga diversifolia* and *Picea jessoensis* var. *hondoensis*) forests are distributed with the maximum occupation ratio at ca. 2,000 m. The coniferous forests will prefer a habitat which is West- to North-facing slope with inclination of less than 25. In the higher zone than 2,000 m, these forests compete with dwarf pine or birch (*Betula ermanii*) forests for occupation according to controlling factors. The coniferous plants are seemed to be snow-intolerant and easily damaged by a loss of the cumulative air-temperature due to snow-cover duration, and by mechanical and physiological injury by snow-cover itself.

(3) Deciduous broad-leaved (*Fagus crenata*, *Quercus mongolica* var. *crispula*, *Betula ermanii* etc.) forests are widely distributed in this area. The Occupation ratio curve has bi-modal peaks at 2,300 m and 1,500 m. The lower one indicates the normal altitudinal distribution of forest zone according to thermal condition. The higher one is introduced by occupation of *Betula ermanii* in alpine-subalpine transitional zone. *Betula ermanii* is snow-tolerant and distributed in mountain slopes of all directions with the maximum frequency in South to East. The east-facing slope is leeward of the winter snow-bearing winds, but receives much snow accumulation by the blowing effect. *Betula ermanii* will occupy a habitat unfavorable for the coniferous mainly because of much snow accumulation.

I. 問題の所在と研究方法

植生帯の分布を支配する第一の要因は適度に降雨の多いわが国では気温であり、気温は標高によって大きく変わる。しかし小さなスケールの分布をきめているのは地形・地質・土壌・微気候などである。この研究ではとくに積算気温と積雪の効果に注目した。具体的にはリモートセンシングの手法を用いて DEM (数値標高モデル: Digital Elevation Model) と気温データから、植生分布を支配している要因について考察を行なうことを研究の目的とした。

研究に用いたデータとその処理の概要は次の通りである。まずリモートセンシング画像を DEM に重ね合わせ、消影処理を行なった後に樹林帯の区分を行なった。次にピクセルごとに DEM から地形特性を、さらに DEM に加えてアメダス気温データと自由大気気温減率とから積算気温を計算した。また、この研究と同じ地域で行なわれた他の研究で得られた消雪期日のリモートセンシング・データも利用した。以上のデータを用いて、植生分布とその支配要因について定量的な考察を行なった。

冬季に寒気が流出する大陸の東側に位置し、蒸発が盛んな暖流が入ってくる日本海をひかえたわが国は世界でも有数の多雪地帯である。積雪は植生の分布だけでなく、種の分化にも関係している (UEMURA, 1989)。冬季の天気界となる梁脈山脈を挟んで、日本海側の植生と太平洋側の植生に明瞭な差異があることはよく知られている。例えば、ブナ林の林床は日本海側ではチシマザサ、太平洋側ではスズタケとなっており、その2次林にも差異がある。亜高山帯の針葉樹林帯 (シラビソ/オオシラビソ) については、渡島半島から白山までの日本海側山地で、この樹林帯が欠如するかあるいは樹林帯をなせずに連続性を欠いた小林分として存在している (石塚, 1978)。

日本海側の多雪山地における亜高山針葉樹林帯の欠如については、落葉樹林との生態学的差異を念頭において、冬季の雪圧・積雪深・根雪期間の長さ・冬季季節風による風衝などに原因が求められ (四手井, 1976)、最近では後氷期にまでさかのぼって植生史の立場からも考察されている (梶, 1982)。石塚 (1978) は、北陸地方から北海道渡島半島南部までの日本海よりの亜高山帯の山岳地帯で広く認められるこの現象について従来の報告を総覧し、針葉樹林帯の欠如や小林分化の状況と本来の針葉樹林帯を代替している植生 (ダケカンバ、ミヤマナラ、ナナカマド) について記述している。

針葉樹の雪に対する性質について酒井 (1976) は以下のことを指摘している。一般に積雪は植物を包むことで寒さと乾燥から守る働きをするが、積雪中の最低温度は雪面より 10~20cm の深さの点にあり、この深さ付近で幹が厳冬期数ヶ月間凍結温度に曝されると、雪面上に幹や枝葉を出す樹木では根からの水分供給が阻まれ、乾燥害を受けやすい。また冬季の樹冠面積が大きい常緑樹は枝葉上に積もった雪の重みによる枝折れの被害を受けやすい。傾斜地の積雪では斜面下方へ向かう大きな移動圧が生じており、樹木は根曲がりを生じて樹幹が完全に折れることを回避している。しかし針葉樹には根曲がりを生じる種類は少なく、樹幹が折倒しやすい。これらの理由から一般に針葉樹は落葉樹に比べ耐雪性が弱い、と酒井 (1976) は述べている。

本研究で対象とする飛騨山脈北部、とくに日本海からの冬季季節風の第一線となる立山連峰付近についても、本来亜高山針葉樹林帯が立地するはずの標高帯にダケカンパなどの耐寒性落葉樹林が侵入し、針葉樹林帯の形成を阻んでいることが報告されている (鈴木ほか, 1963; 鈴木, 1965)。

冬季の樹木の耐雪性の問題とは別に、根雪期間が長いために生じる消雪後の生育期間の不足あるいはその期間の積算温度の不足 (四手井, 1976) は、いわば多雪地域の夏の問題である。しかし消雪の期日については精度のよいデータを広域にわたって得ることは困難であった。初雪や根雪の開始期日に比べると消雪期日は場所による違いが著しい。とくに山岳地域では吹き寄せや雪崩による積雪深の不均一さを反映して、モザイク状に消雪が進行するからである。

広域にわたって消雪期日データを得るのには、リモートセンシングがきわめて有効である。すなわち時系列的に得られている画像データを重ね合わせて解析することで、ピクセル単位の空間的分解能で消雪期日を特定することが可能である。ただしこの研究で用いた消雪期日のデータは、この地域で行なわれた別の目的 (融雪流出) の研究 (春日・野上, 地学雑誌投稿予定) で得られたものを使用している。

もちろん広域の植生区分調査にもリモートセンシングは有効であり、同じ空間的分解能で植生分布を解析できる。現地調査や空中写真判読によって植生調査を行なう方法に比べると、人工衛星データを利用する方法は、広域にわたる同時のデータが得られること、さらに季節を異にする複数のデータから、phenology (生物季節学) に立脚した解析が可能となること、などの利点がある。

現地調査による植生調査は高層の木本植物から最低層の草本植物までを含めて行なわれているのに対し、リモートセンシングによる解析では上空から見た画像データを用いるため最高層の木本植物による林相の分類ということになる。そこで、リモートセンシングによるものは、リモートセンシングによる林相 (分類)、あるいは単に樹林 (帯) と表現することにする。

いっぽうリモートセンシングの技術的な面からみると、地形が急峻な山岳地帯では衛星画像データの輝度は地表面の傾斜の影響を強く受けているので、それを消去することが必要である。さらに太陽光の方向は季節変化するので、期日の異なる画像データを重ね合わせて解析を進めるには、それに対する配慮も必要である。この研究で取り上げた立山連峰周辺は3,000m級の山岳が連なり、日本でも最も起伏の大きい地域である。この地域について、25,000分の1地形図からDEMを作成し、そのDEMのグリッドに合うようにランドサットTMデータのリスAMPLINGを行ない、その画像についてDEMから斜面の方位・傾斜を計算し、斜面の輝度に対する影響を抽出・消去することを試みた。

またこのように画像に重ね合っているDEMがあるので、アメダス気温観測値と自由大気気温減率 (いずれも日値) を用いた推定式によって毎日の気温の数値地図 (衛星画像のピクセル単位の気温値) を作成し、残雪によって阻害された生育期間内の積算温度を求め、その損失の効果を分析することも可能となった。もちろん、DEMによって植生の地形的立地条件 (標高だけでなく斜面の傾斜と方位) も定量的に解析可能となった。

II. 使用データの説明

1. DEM

全国を網羅する標高データとしては、国土地理院の国土数値情報の標高データがある。しかし今回用いるランドサット TM の地上分解能 30m に対して、この標高データの約 250m メッシュは粗すぎる。そのため次のような手続きで DEM を作成した。

25,000分の1地形図に、国土数値情報の3次メッシュ(約1kmメッシュ)をさらに南北8等分、東西10等分したメッシュをかけ、格子点の標高値を等高線間隔の比例配分で1m単位で読み取った。このメッシュ間隔は、緯度/経度にして3.75秒/4.50秒にあたり、立山付近では、地図上では南北約4.6mm/東西4.5mmに、実際の距離では約112m/116mに相当する。黒部湖水面の標高は地形図より推定して1,435mであるとし、対象地域外になる後立山連峰の東側斜面は後の処理をしやすいするため、0のコードをあてマスク処理に使用した。対象とする地域は約25,000ピクセルの大きさ(約320km²)であった。以上の研究対象地域とその周辺の概要を図1-A, Bに示す。

さらに、TM データの分解能との整合を図るため、この DEM に機械的な内挿法を適用して、メッシュ

図 1 研究対象地域の位置 (A) および概要 (B)

表 1 林相分類に使用したランドサットデータ概要

年 月・日	1987年	
	7月16日	10月10日
センサー	TM	TM
path	109	109
low	35	35
撮影時分	9時58分	9時56分
時角	S 27.9° E	S 28.4° E
累積日数	197日	284日
赤緯	21.4°	-7.0°
太陽高度	61.5°	39.0°
太陽方位	S 69.8° E	S 37.4° E

北緯36° 30′, 東経137° 36′ を基準として計算した。

いた奥田・中根 (1988) の例では春, 夏, 秋のデータを比較し, 春の5月は落葉広葉樹の新緑の時期にあたっており, 同地域の植林された常緑針葉樹と顕著に異なる反射スペクトル特性を持つため, 他の季節に比べて相観植生レベルでの分離がうまく行くとしている。われわれの研究では, 対象地域での主要な関心が主に落葉広葉樹林と常緑針葉樹林の分離であることから, また多雪地域のため春のデータでは残雪が多くその処理が別に必要となることから, 紅葉の前の夏と, 紅葉後の秋のデータを用いることにした。具体的には夏季データは1987年7月16日 (以後, 夏データ), 秋季データは1987年10月10日 (以後, 秋データ) の, いずれもパス109, ロウ35, 通称高山 (飛驒) シーンの TM データ北東サブシーンを使用した。表1に各データの概要を示す。

3. 気温データ

各林相が成立している温度環境を考察するために, 各ピクセル単位の気温を推定する。具体的には既存の気温観測点の値をもとに, 気温遞減率を用いて各ピクセルの標高に応じた気温を計算した。そして, これを加算して積算気温 (day-degree) を求めることになる。

気温データとしては, AMeDAS観測点の白馬, 大町 (長野県), 桧尾 (岐阜県) の3地点の気温を使用した。気温遞減率は輪島高層気象観測所の地上と 700mb 面 (高度は地上約 3,000m) の気温差と高度差から計算した。つまり解析対象地域の近くの AMeDAS の気温をもとに, 輪島の気温遞減率を用いて, それぞれの標高値を持つ各ピクセルの気温を外挿推定する。AMeDAS は気象庁提供の磁気テープ, 輪島のデータは「Aerological Data of Japan」によった。さらに7, 8月のみではあるが, 上記の方法で求めた気温の妥当性を検証するために, 気象協会委託による「夏山の気象観測表」から立山大観峰, 立山室堂, 立山弥陀ヶ原, 三俣蓮華岳の各データを使用した。表2にこれら各地点の標高と位置を示す。

4. 消雪日データ

消雪日データの算出 (春日・野上, 地学雑誌投稿予定) に用いられたランドサットデータの期日は次の通りである。1986年では, 3月13日, 4月14日, 4月30日, 5月8日, 1987年では4月17日, 5月19日, 6月4日, 7月16日, すべての回帰日のデータがないのはもちろん雲の多い天候のせいである。これら各観測日の画像について積雪域と消雪域の分類が行なわれている。実際の消雪日はそのピクセルが積雪域から消雪域へと変化した期日に挟まれる期間中のどこかにあるわけであるが, ここではその中間日 (1986年では3月29日, 4月22日, 5月4日, 1987年では5月2日, 5月27日, 6月25日) に消雪したとして, 積算

間隔を2分割した DEM を作成した。このとき約 56m×58m のメッシュ間隔となり, データ量は4倍となる。TM の分解能を活用するにはもう少し細密な DEM の方が望ましいが, 消雪日データでは TM のほかに解像度約 80m の MSS も用いていることなどから, このメッシュ間隔を採用した。25,000の1地形図での標高値の読み取り作業の状況からも, この程度のメッシュ間隔が妥当であると考えられる。

2. ランドサットデータ

ランドサットデータを用いて林相分類を行なうに際し, 林相の季節的な変化を利用するために異なる2季節のデータを用いることにした。妹尾ほか (1983) では, 丹後半島での林相区分に際して紅葉を前後に挟む MSS の9月と11月のデータを用いている。また, 一季節の MSS データを用

表 2 気温データ概要

	観測地点	標 高	緯 度	経 度
1	白馬	703m	36° 41.7' N	137° 51.9' E
	大町	784m	36° 31.2' N	137° 50.4' E
	栃尾	765m	36° 14.8' N	137° 30.6' E
2	立山室堂	2,454m	36° 34.5' N	137° 36.2' E
	立山大観峰	2,316m	36° 34.0' N	137° 38.0' E
	弥陀ヶ原	1,980m	36° 34.0' N	137° 33.6' E
	三俣蓮華岳	2,552m	36° 23.6' N	137° 36.6' E
3	輪島	6m	37° 23.4' N	136° 53.9' E

- ・ 1: AMeDAS 観測資料 (1979年~1986年 : 3月~9月)
- 2: 夏山の気象観測表 (1976年~1985年, 1987年: 7月~8月)
- 3: Aerological Data of Japan (1981年~1985年 : 3月~9月)

図 2 標高値の頻度分布

図 3 最大傾斜方位の頻度分布 (16方位)

気温の計算などを行なった。

上記の気象および画像データ処理のうち磁気テープからの切り出しは東京都立大学電算室の大型電算機を使用し、その他の数値計算や解析処理はすべてパソコン上で行なった。写真原稿のポジ画像の撮影には(株)テクネ社の画像処理装置 FBX 24とフィルムレコーダを使用した。

III. 調査地域

1. 地形の概要

本研究では、北アルプスのほぼ中心をなす三俣

蓮華岳 (2,841m) から、後立山連峰の赤沢岳 (2,677m) への稜線と立山連峰の立山雄山 (2,992m) への稜線とに挟まれた黒部ダム湖集水域と、立山連峰西側斜面を解析対象地域 (図 1-B) とする。

図 4 最大傾斜角度の頻度分布

DEM より作成した高度段彩図を口絵 2: 写真 1 に, その標高度数分布を図 2 に示す。対象地域の平均標高は, 2,030m, 最高点は立山雄山付近の 2,940m, 最低点は常願寺川河床の 680m である。

同様に DEM から計算したピクセルごとの最大傾斜方位を口絵 2: 写真 2 と図 3 に, 最大傾斜角度を口絵 2: 写真 3 と図 4 に, それぞれの分布図と度数分布図で示す。山脈の走向と対象範囲の選び方を反映して, 西～北西向きの斜面が多い。平均傾斜角度は約 15 度で, この地域の起伏の大きさを示している。写真 3 によれば, 緩傾斜の部分は, 黒部川源流の三俣蓮華岳から太郎山にかけての北向斜面, 立山火山の溶岩流による弥陀ヶ原, 五色ヶ原の平坦地, および立山火山カルデラ底などにみられる。急斜面は主に, 針ノ木岳西壁, 薬師岳圏谷群の下部, 常願寺川河谷などにみられる。

山脈の走向が日本海からの冬季季節風とほぼ直交するために, この地域は日本有数の豪雪地帯で (口絵 2: 写真 4 に 1 月の降水量を示す), 梅雨季と合わせて年降水量は 5,000mm を超える。

2. 植生分布

本研究対象地域の植生に関する従来の調査としては, 現在の黒部ダム集水域である奥黒部地域を中心に, 鈴木ほか (1963, 1965), 鈴木 (1965) により現地調査や空中写真を用いて行なわれたものがある。これらの報告によってこの地域の植生概況を以下に述べる。

山腹のブナ林 (ブナ=チシマザサ群集) の高度限界は標高 1,600～1,700m であり, 亜高山帯針葉樹林はオオシラビソ林 (アオモリトドマツ, シラベ・アオモリトドマツ群集), クロベ林 (クロベ=ジャクナゲ群集) がみられ, 各々独立の群集を形成している。本地域の特色として, 亜高山ダケカンバ林 (ダケカンバ群集) が一群集を形成して針葉樹林帯が卓越すべき高度に侵入しており, また針葉樹林帯とハイマツ帯の間の標高 2,200～2,400m にも断続的ではあるが帯状に分布している。

黒部源流部ではオオシラビソ林の発達が目著であるが, 北部の黒部ダム湖周辺ではオオシラビソ林はごく小林分となり, 標高 1,600～2,400m 間には広くダケカンバの群集がみられる。またオオシラビソの分布は方位に選択性があり, 西～北西～北斜面に限られる。ダケカンバの分布方位はとくに選択性はないが冬季季節風の風衝側の西側斜面に少ない。これらの分布の特徴は, 冬季季節風の風衝・風背の違いによる積雪量の違い, および日本海からの距離による南北方向の積雪量の変化によるものと思われる。ハイマツ (ハイマツ=コケモモ群集) の分布は森林限界以上の標高帯に広くみられる。ともに黒部源流部の黒部五郎岳, 雲の平, 三俣蓮華岳から野口五郎岳付近に大群落が発達している。分布方位はほとんどが北～西であり, 東～南斜面はまれである。

ハイマツの成立も困難なほどの風衝地・残雪地では高山性の草本群落が発達している。また着雪もしないような急傾斜地, あるいは草本類も生育できない傾斜地や残雪地は露岩地になっている。これらは主に稜線頂部付近やカール壁・カール底, あるいは雪崩道になる谷底などである。以上が鈴木ほか (1963, 1965), 鈴木 (1965) による植生分布の概況である。

IV. ランドサットデータによる林相分類

1. ランドサットデータと DEM の重ね合わせ

先に述べた約 56m×58m の DEM にランドサットデータを重ね合わせるために, アフィン変換とリサンプリングを行なった。まずそれぞれの画像から 25,000 分の 1 地形図と位置が明瞭に照合できる河川分岐点やダム堰堤, ダム湖岸, 隣接する大町市街の橋梁などから三十数点の GCP (地上基準点) をまず選び, 試行錯誤でそのうち良質な十数点の位置データを用いて, 座標変換のためのアフィン係数を最小自乗法で決定した。起伏の大きい山岳地帯では視差差の消去のための透視変換を行なうべきかもしれないが煩雑であるため, GCP の採取エリアを解析対象地域よりも広くとって, 同じような標高の点を選ぶようにして, GCP の視差差がアフィン係数に大きな誤差をもたらさないような配慮をするにとどめた。

この係数をもとに最近隣法を用いて画像のリサンプリングを行ない, DEM に重ね合わせた結果, それ

それぞれの季節の画像で最大誤差が0.3ピクセル以内に収まった。これにより2つの季節のデータ間の誤差は最大でも、1ピクセル 30m 以内に収まることになる。分類する林相の占める領域の大きさがこの誤差よりも十分に大きいと仮定すれば、結果において2つの画像のずれによる誤分類は領域の境界付近にとどまるであろう。

2. 分類項目

当初は落葉広葉樹をブナとダケカンバに、常緑針葉樹をオオシラビソとクロベの群集に細分する予定であったが、画像データからはそれぞれの項目を細分できるほどの差異を抽出できなかった。よって分類項目は最終的に以下の6項目とした。

- ①落葉広葉樹林（ブナ、ダケカンバを主とする）
- ②常緑針葉樹林（クロベ、オオシラビソを主とする）
- ③ハイマツ
- ④草地
- ⑤裸地
- ⑥開放水域（主として黒部湖）

教師付き分類のための標本データを得るために、まず各項目ごとに約20,000分の1カラー空中写真から上記項目を判読し、25,000分の1地形図にプロットした。ここから原則として、DEMの3ピクセル四方以上にわたって林相が一樣と思われる地域をトレーニングエリアとして採用し、各項目について5個所以上を標本として抽出した。裸地についてのみ画像処理装置画面上からトレーニングエリアを決定し、輝度データを読み取った。この時点で明らかに異常な輝度を示すものは除外した。

3. 画像の消影と比演算法について

TMのBAND3 ($0.63\sim0.69\mu\text{m}$)に相当する赤色光の反射波長帯は、植物中のクロロフィルによる吸収を受けるため、植物の活性がよいほど反射率は低く、輝度は低くなる。これと逆に、BAND4 ($0.76\sim0.90\mu\text{m}$)に相当する近赤外の反射波長帯は、光合成の度合や活力指標を示し、植物の活性がよいほど反射率は高く、輝度は高くなる。この赤色域で輝度が低下し、近赤外から中間赤外域にかけて輝度が非常に高くなるのが植物の特性である。よってBAND4をBAND3で除した比の値は活性の高い植物ほど高い値を示し、活性の低い植物ほど低い値を示すため、植生分類によく使用される。そしてこの比演算を行なうことである程度の消影効果も期待できる。しかし今回の対象地域は、斜面勾配の平均値が15度という急傾斜地であり、比演算処理だけで斜面傾斜の影響が除去できるかどうか疑問であった。

口絵2:写真5-1, 2は、夏秋それぞれの季節の画像をナチュラルカラー表示したものである。植物反射域に緑色を与えてあるので、人間の目で見たと自然の色に近い。この写真で見ると、とくに秋の画像に陰影が非常にはっきり見える。しかしDEMを用いて傾斜角度を計算してみると、この時期でも太陽高度は十分に高く、直達日射が遮られてできる日影はほとんど生じていないことがわかった。つまりこの陰影は、主としてその点における斜面の法線ベクトルと、太陽光線ベクトルのなす入射角度の余弦に依存している（ランベルトの法則）としてよいであろう。

そこで実際に衛星画像でどうなっているか調べるために、トレーニングエリア内のピクセルの輝度と、斜面の法線と太陽光線のなす角の余弦 ($\cos \alpha$) との散布図を各バンドごとに作った（図5）。近赤外のBAND4と中間赤外のBAND5の2つのバンドの輝度は $\cos \alpha$ の値との間に比例関係が認められるが、他のバンドでは比例関係は認められない。

後述する方法で開放水域と裸地、草地を分類抽出した後の全ピクセルについて、BAND4・BAND5・BAND3の輝度と $\cos \alpha$ の散布図（図6）を描いてみたが、やはりBAND4・BAND5では輝度の $\cos \alpha$ の値への依存性が認められる。BAND4・BAND5は植物の反射スペクトル領域であり、その輝度が相対入射角度の影響を受け、それ以外の波長領域では輝度はその影響をほとんど受けていない。これま

図 5 各バンドにおける輝度（縦軸：CCT 値）と相対入射角度（横軸： $\cos \alpha$ ）の関係

での比演算法では、どの BAND でも斜面方位の影響が同等に現われるとの前提で行なわれ、緩傾斜地では比演算法のみで斜面の影響を取り除けるとされてきた。しかし、相対入射角に大きく依存する BAND 4 の輝度を、相対入射角に依存しない BAND 3 の輝度で除しても、必ずしも斜面方位の影響を十分には除去できないことになる。そこでこの研究の場合のようにすでに DEM と重ね合わせが行なわれている場合には、BAND 4 の輝度に与えている相対入射角の影響を取り除くことで目的が達せられる。

具体的な処理としては図 6 において、回帰直線の傾きの分だけ全ピクセルの重心の周りに回転させて、全ピクセルの新しい輝度を求めた。当然のことながらこの処理で輝度と $\cos \alpha$ の相関はなくなる（図 7）。今後この変換を消影処理と呼ぶことにする。口絵 2：写真 6-1, 2 は消影処理済み BAND 4 を用いたナチュラルカラー表示である。変換前の画像に比べて、肉眼的にも消影効果が確かめられる。

4. 林相分類

口絵 2：写真 7 は、消影処理を施していない元の BAND 4 を用いた、夏データと秋データのそれぞれで計算された $(\text{BAND 4} \div \text{BAND 3})$ と $(\text{BAND 4} \div \text{BAND 2})$ の、合計 4 個の変数をもとに重判別分析

を行なった結果である。この時点では、分類項目のうち落葉樹をブナとダケカンバに、針葉樹をクロベとオオシラビソに、草地を空中写真撮影時に緑色に見えているものと枯れた色に見えているものとに、それぞれ細分して分類してある。黒部湖周辺の樹種分布は空中写真と環境庁発行の現存植生図と比べて概ね一致をみているものの、立山から薬師岳にかけての稜線の西側や黒部源流部では落葉樹が針葉樹、とくにハイマツと誤分類されているのが目だつ。とくによく目だつのは裸地や草地、ハイマツの占める面積が広すぎること、稜線付近にあり得ない開放水域が目だつことである。これは、斜面方位の影響を受けた BAND 4 の値をそのまま使用し、その影響の小さい BAND 3 や BAND 2 で除しても、植物におおわれた地域で比演算値が大きくバラつくことになり、誤分類の原因となったものと推定される。

裸地や開放水域のスペクトル特性は、植物等のそれとは明瞭に異なっており、散布図上では、植物とは別の明瞭なクラスターを形成している(図 5 参照)。よって、これらは散布図を用いて、消影処理前に分類抽出した。

開放水域については、BAND 4、BAND 5、BAND 7 が水の吸収帯にあたり、とくに植物の反射帯にあたる BAND 4 において、植物とは明瞭に異なるクラスターを形成している。また、谷底の水域(河川水面)の傾斜は一般に緩く、相対太陽高度はほぼ一定である。秋の画像ではダム湖の水位がかなり低下しているため、夏の画像を使い、開放水域とその他を区分した。

裸地は BAND 4、BAND 6 以外のバンドで、いずれも他の分類よりも非常に高い輝度を持っている。そのうち BAND 1 において裸地と植被域との分離が最もよかったため(図 5)、秋データの BAND 1 に

図 6 輝度と相対入射角度の散布図

上から BAND 4, 5, 3。左は夏, 右は秋データ。

図 7 消影処理後の輝度と相対入射角度の散布図

BAND 4。左は夏, 右は秋データ。

図8 草地とその他の植物域との散布図

縦軸は消影処理済み BAND 4,
横軸は無処理 BAND 5。

図9 落葉広葉樹と常緑針葉樹の差異

図10 ハイマツとその他の針葉樹の散布図
横軸のAは夏の消影 $BAND4 \div BAND3$, 縦軸のBは夏の消影 BAND 5, Cは夏の消影 BAND 4。

が、今度は尾根部分で、誤判別がやや増えた。草地も、他の木本類の分類項目とは異なった高い輝度を示す。これは草地が、植被域と裸地域の中間の性質を持つためと思われる。草地は、裸地と開放水域を省いた消影処理済み BAND 4 と無処理 BAND 5 によって分類抽出した (図8)。以上に述べた開放水域・裸地・草地の3項目の抽出画像を口絵2:写真8に示す。

以上の操作の後、残ったピクセルを落葉広葉樹林、常緑針葉樹林、ハイマツとみなし、さきに述べた消影処理を BAND 4 に施した。これ以上の細分類は、上記の3項目のように2変数程度で分離できるほどの輝度の差がないので、夏秋それぞれの $(BAND4 \div BAND3)$ の比演算値、夏の $(BAND4 \div BAND3)$ から秋の $(BAND4 \div BAND3)$ を引いた差の値、夏の BAND 4 から秋の BAND 4 を引いた差の値 (季節変化の抽出) という4つの変数を使って重判別分析を行ない、落葉広葉樹林と常緑針葉樹林に分類した。これら4変数の平均値の樹種による差を図9に示す。ここでどちらにも判別できない曖昧な変数値を持つものは、「未分類」とした。

この後、常緑針葉樹と判別された中から、図10を利用して、ハイマツを針葉樹から分離した。しかし、ハイマツの存在し得ない低い標高の谷底にハイマツが誤判別されているため、この付近のハイマツの下限高度の標高 2,000m 以下でハイマツと判別されているものは、すべて常緑針葉樹林の枠内に戻した。分類の最終結果画像を口絵2:写真9に示す。「未分類」項目は針ノ木岳東壁の急斜面や、谷底に多くみられる。

において88以上の輝度を持つものを裸地と判定した。この段階では、薬師岳東側斜面のカル群をはじめとする山腹の雪崩崩壊地がよく抽出されている。しかし、河床部や細い谷底の裸地の抽出は悪く不完全である。

そこで、再度河床裸地のトレーニングエリアをとり、夏データの BAND 3 の輝度 53 以上のものを裸地としてつけた。河床部については抽出がかなりよくなった

V. 地形要素, 消雪期日, 積算気温との関係

1. 積算気温の計算について

衛星データ取得日の天候や費用の問題から消雪日については、1986年と1987年の2年分のデータしか得られていない。消雪期日は年による違いよりも地形や標高による違いの方が大きいと考えた。気温データは日平均気温に近い値となる午前9時の AMeDAS データを用いた。気温通減率は、輪島の地上と700mb面の気温差と高度差から算出した（輪島通減率と呼ぶことにする）。7・8月については夏山気象観測表のデータが使用可能であるが、希望する全期間がカバーされていないので参考にするにとどめた（後述）。

まず輪島通減率、3地点の AMeDAS 気温データ、夏山気温データについて、日値としては注目期日を挟む5日間の移動平均値とすることにして、1981年から1985年の5年分についてそれぞれの平均値をそれぞれの期日について計算した。この移動平均化した AMeDAS の気温と輪島通減率を使って、夏山データ各観測点に相当する標高点の推定気温を計算した。この推定値と夏山データ実測値との間には高い相関がみられる（表3）。そのなかで AMeDAS 白馬観測点のデータを用いたときの推定値が実測値と最もよい相関を示すことがわかったので、以後それを用いることにした。このようにして得られた白馬観測点の気温と輪島の気温通減率を用いて、各ピクセルに固有の標高値から各ピクセルの気温を計算した。この気温をある期日間積算すれば、各ピクセルの積算気温（day-degree）が得られる。

表3 AMeDAS と輪島通減率からの推定値と実測値との相関

	室堂	大観望	弥陀ヶ原
白馬	0.96	0.97	0.98
大町	0.92	0.92	0.95
栃尾	0.90	0.92	0.95

積雪の有無を無視した積算気温（以後、単純積算気温）は、消雪日データのある3月13日から初秋の9月15日までの期間を対象として計算を行なった。消雪期日以降の積算気温（以後、消雪後積算気温）の計算では計算開始日を第II章で述べたように、それぞれのピクセルの消雪を前後に挟むランドサット画像撮影日の中間の日（推定消雪日）とした。

図11 各分類項目ごとにみた標高帯別出現頻度

図12 各分類項目ごとにみた標高帯別占有面積率

一般に植物が生産を始める最低気温として、摂氏10度がよく用いられる（四手井，1976；内嶋・清野，1988）。ここでは月平均気温の積算値（温量指数）に使用される 5°C という温度を日単位の場合についても採用して、 5°C を超える日についてその値から 5°C を減じた値を積算した。

2. 林相分類結果と地形要素との考察

各分類項目の標高についての頻度分布を図11に示す。落葉広葉樹の頻度分布は1,500m 付近と2,300m 付近に2つのピークを持つが、その間の谷はそれほど明瞭ではない。その他の項目では常緑針葉樹が2,000m 付近に、ハイマツと草地が2,500m 付近に、裸地はそれよりやや高い2,700m 付近にそれぞれ頻度のピークがある。未分類項目は標高にあまり依らないで分布している。ハイマツの頻度分布で2,000-2,200m の小さなピークは、常緑針葉樹がハイマツと誤分類されていることに起因する可能性がある。裸地の頻度が1,000m 以下の低い標高帯で小さな高まりを見せているのは、常願寺川上流の河床がカウントされて

いるからである。ハイマツと落葉広葉樹の高度分布の増減が拮抗する、2,300m から2,500m の間に森林限界があると考えられる。これは鈴木ほか（1963，1965），鈴木（1965）の指摘とほぼ一致する結果である。

針葉樹林帯の上にダケカンパ群集がみられるという報告（鈴木ほか，1963；鈴木，1965）から判断して、落葉広葉樹の高度分布については、落葉樹のピークのうち1,500m 付近のものはブナ林、2,300m 付近のものは亜高山帯ダケカンバ林であろう。

標高帯ごとの全ピクセル数に占める各分類項目の割合（占有面積比あるいは出現率，図12）をみると、特徴がさらにはっきりする。2,000m 付近に頻度のピークを持つ常緑針葉

図13 各分類項目ごとにみた最大傾斜方位(16方位)別占有面積率

樹林の上と下に落葉広葉樹林の頻度のピークが2つ現われている。2,800m 以上では、ほとんど裸地と草地となる。1,000 m 付近の河床裸地のピークも明瞭である。

以上のことから、従来から指摘されてきた亜高山帯における針葉樹林と落葉樹林の競合は、2,000m 以上の標高帯で顕著な現象と思われる。また、2,000m 以上に分布する落葉樹は、ブナ林ではなくほとんどダケカンバ林であると推定されるため、以後その高度帯での落葉樹という記述は概ねダケカンバ林をさすと解釈してよい。

図13は各分類項目ごとにみた斜面方位別の占有面積率を示す。落葉広葉樹と草地、裸地が冬季季節風の風背斜面となる南～東斜面に、常緑針葉樹とハイマツが風衝斜面となる西～北斜面に、それぞれ明瞭に分かれて分布していることがわかる。

各分類項目ごとにみた標高と斜面方位別の出現頻度を図14に示す。この図から、同じ高度帯に分布する落葉広葉樹と常緑針葉樹／ハイマツは斜面方位によって明瞭にすみ分けていることがわかる。

各分類項目ごとにみた最大傾斜角度別の占有面積率

を示す図15から、30度を超える急傾斜地では落葉広葉樹の占める割合が大きくなり、常緑針葉樹の占める割合が小さくなることがわかる。富山県（1979）の調査では、オオシラビソは浅根性のため、傾斜が30度以上になる場所では雪崩に対しての抵抗力が弱く、生育困難とされているが、それを支持するデータが得られたことになる。

ハイマツの頻度分布は、雲の平などの黒部源流部の緩斜面に大群落がみられるように、傾斜の緩い方へ偏っており、逆に、「未分類」は急傾斜地に多くなる。さらに分類図（写真9）を見ても、未分類ピクセルは谷底や急崖部にあたっていることが多い。これには消影処理に用いた DEM の精度が関係しているかもしれない。すなわち地形が busy な（細かく激しい起伏のある）谷や急崖の部分については、約 100 m 間隔の格子の DEM ではその地形を表現しきれず、輝度補正も十分でなかったと思われる。

図14 各分類項目ごとにみた標高と最大傾斜方位別出現頻度

図15 各分類項目ごとにみた最大傾斜角度別占有面積率

図16 各分類項目ごとにみた標高と最大傾斜角度別出現頻度

図17 各分類項目ごとにみた最大傾斜方位と最大傾斜角度別出現頻度

い期日から始まり、5月中旬以前に8割のピクセルで消雪していることから、針葉樹の分布に影響する限界消雪日（それ以上消雪が遅れると生育に影響をもたらすと思われる日）は、おそらく5月中旬から末にかけてだと考えられる。

落葉樹分布地の消雪期日ピークは、針葉樹のその過ぎた後にあり、5月上旬から6月上旬までがピークになる。針葉樹であってもハイマツの消雪期は、むしろ落葉樹に似ていて、4月中旬から6月中旬までがピークになる。

草地についてはそのピークは明瞭で、6月に入って急に消雪の割合が上昇する。裸地についても同様であるが、4月以前に消雪している裸地は着雪さえしないような急斜面の露岩地と考えられている。図16で、草地は裸地よりも若干低標高・緩傾斜地に位置することから、消雪の非常に遅い地域の内では、その消雪期日だけでなく、標高と傾斜により草地か裸地かの分布が決まるものと推定できる。

単純積算気温値が季節とともにどのように増えて行くかを図21に示す。針葉樹林が最も占有面積を

各分類項目ごとにみた標高と傾斜角度別の出現頻度を図16に、方位と傾斜角度別の出現頻度を図17に、それぞれ示す。

3. 林相分布と消雪期日、積算温度との考察

図18は方位別の消雪ピクセル数がランドサット観測日ごとにどのように増えていくかを示している。3月中旬頃西向き斜面にすでに無積雪地があり、4月下旬頃までは東向き斜面では消雪が進まない。しかしその後は方位にあまり関係なく消雪が進行する。リモートセンシングで判別できるのは消雪期日であるが、一般に標高が同じなら消雪期日が遅いところほど積雪量も多いと考えられる。従って植生分布と消雪期日の関係を論ずる時、消雪期日だけでなく積雪量そのものに起因する影響（雪圧による枝折れなど）も同時に含まれる。

次に各観測日間ごとの消雪ピクセル中に占める、各分類項目の比率を図19に示す。この図から早く消雪するピクセルは常緑針葉樹となっていることが多いが、消雪が遅れるに従って落葉広葉樹やハイマツが相対的に多くなることがわかる。図20は分類項目別にみた消雪ピクセル率（全部消雪したときを100とする）の季節変化を示している。

やはり針葉樹の分布地域では消雪が早

図18 方位別無雪ピクセル数の季節変化

図19 2つのランドサット観測日間に消雪したピクセル数中に占める各分類項目の割合

図20 各分類項目ごとにみた消雪ピクセル面積率の季節変化

図21 各標高帯における単純積算気温の季節変化

げる標高2,000m (図12) を針葉樹林の最適環境と考える。いっぽう生育限界はまえに述べたように標高2,400m 付近とされている。針葉樹林帯の大半で消雪する5月半ばでは、単純積算気温は、標高2,000m 以上ではまだほとんど0で、従ってそれまでに消雪すれば、積雪で無駄になる積算温度はほとんどない。また高度限界の標高2,400m 付近では積算気温は6月初めまで0である。標高2,400m の地点で積算気温が0でなくなる頃までに、標高2,000m では積算気温値は約30度日に達している。この高度帯では春先の残雪による積算気温の損失が30度日に達すると、針葉樹林の分布限界帯と同じになる。

以上のことから、針葉樹にとって消雪が遅い地点の春先の温度環境は、標高が低くても標高2,400m の

高度限界帯と同じであると解釈できる。図22に、すべてのピクセルについて単純積算気温と、消雪後の積算気温との差（積算気温の積雪による損失）をとり、その頻度分布を各項目ごとに示す。針葉樹林では積算気温の損失が100度日以上になることは少なく、損失が大きいと落葉樹に代わっているものと予想される。また標高の高いところで積雪による損失の大きいところはハイマツ・草地・裸地となっている。

図22 各分類項目ごとにみた損失積算気温と標高別出現頻度
項目は図17と同じ。

4. 林相分布のまとめ

以上の考察から各分類項目について分布特性をまとめる。

①落葉広葉樹

低地から亜高山帯までの広い標高帯を占め、北西～北の範囲の方位にはあまり分布しない。またかなりの急傾斜地まで分布している。高い標高地の落葉広葉樹は主にダケカンバ林と思われるが、その消雪期日は針葉樹林に比べて遅い。本来亜高山針葉樹林帯が占有する高度帯で多雪のように針葉樹の生育を阻害する要因があるとき、そこに代償的に分布しているものと考えられる。

②常緑針葉樹

標高による頻度分布の中心は2,000m付近で、それよりも高い場所では消雪期日・傾斜方位・傾斜角度などの環境条件によりハイマツ、あるいはダケカンバと競合する。落葉樹に比べて傾斜・方位などの制限を受けやすい。耐雪性は弱く、消雪期日の早いところに分布している。

③ハイマツ

森林限界上 2,500m 付近に頻度分布のピークを持ち、稜線西側の緩斜面に好んで分布する。ハイマツ地の消雪期日は常緑針葉樹より遅いが、草地よりは早い。ハイマツは耐雪性を備えた針葉樹であるとみることできる。

④草地

森林限界上の標高帯を占め、東側斜面の雪がかなり遅くまで残るところに分布する。積雪のため生育期間が短く（従って積雪深も大きく）高木樹の生育が不可能なところに分布している。

⑤裸地

山頂部と谷底に二分して分布する。山頂部の裸地は、着雪もしないほどの急崖か、草地さえも成立できないほど積雪が遅くまで残るところである。

VI. まとめ

山岳地域のリモートセンシングにおいて、DEMを使用した消影処理を行なうことによって解析の精度を上げることができた。林相分類の結果については、狭域についての従来の報告とかなりの一致をみた。従って、より広域の山岳地帯の林相分類に比較的良好な精度を保ったまま、リモートセンシングの手法が使えることがわかった。

また DEM に画像が重ね合わさっているため、ピクセル単位で計算される地形特性や気温の推定値を使って、判別結果の画像についての定量的解析が可能となり、リモートセンシングの有効性が高まった。

亜高山帯のハイマツ・常緑針葉樹・落葉広葉樹は同じ標高帯においても斜面の方位・角度等による明瞭

なすみ分けがみられた。なかでも斜面方位によるものは、消雪期日の違いに示されるように積雪によるものである。消雪が6月以降まで遅れるところには標高が低くても針葉樹は分布できないが、その理由としてその積雪深が大きいことによる枝折れなどの雪害が生じるだけでなく、気温が上昇している春にまだ積雪が続くため積算気温の損失があることが重要なのではないかと考えられる。

謝 辞

この小論は第2著者の指導のもとで第1著者が行なった東京都立大学地理学科の卒業研究をまとめたものである。気温データ処理については同大学大学院博士課程の須田芳彦氏から、またプログラミングについては同じく吉山 昭氏から多くの助言を頂いた。また同修士課程の春日 仁氏（現三菱総研）は労力のかかる DEM を共同で制作し、さらに消雪日データを提供していただいた。以上の方々に感謝いたします。また研究の全般にわたり援助を頂いた同大学近藤昭彦助手に感謝の意を表します。

この研究の一部に、文部省科学研究費重点領域「地球環境」（代表：東大生産研教授、高木幹雄）の公募研究「衛星画像と DTM の重ね合わせによる温度環境の推定と森林分布の対応」（研究代表者：野上道男、課題番号：01646519）の費用の一部を使用した。

文 献

- 妹尾俊夫・岩浪英二・田中總太郎・杉村俊郎（1983）：比演算を施した二季節のランドサット MSS データによる広域山地の林相区分。日本リモートセンシング学会誌，**3**，55-64。
- 石塚和夫（1978）：多雪山地亜高山帯の植生（総合抄録）。吉岡邦二博士追悼植物生態論集，404-428。
- 梶 幹男（1982）：亜高山帯性針葉樹の生態地理学的研究——オオシラビソの分布パターンと温暖期気候の影響——。東大演習林報告，**72**，31-120。
- 春日 仁・野上道男（地学雑誌投稿予定）：リモートセンシング・データと数値地形モデルを用いた黒部ダム流域の積雪分布と融雪量の推定。
- 奥田敏統・中根周歩（1988）：ランドサット MSS データの植生解析への応用——福岡県北西部の例——。日本生態学会誌，**38**，85-89。
- 酒井 昭（1976）：植物の積雪に関する適応。低温科学，植物篇，**34**，47-76。
- 四手井綱英（1976）：森の生態学。講談社，261p。
- 鈴木時夫（1965）：奥黒部地方の高山および亜高山帯植生の植物社会学的研究。北アルプスの自然，**219-254**。
- 鈴木時夫・海津幸雄（1965）：奥黒部，立山および白山のハイマツ低木林と高山ハイデ。日本生態学会誌，**15**，113-124。
- 鈴木時夫・岡本省吾・本多啓七（1963）：奥黒部の亜高山帯森林植生。日本生態学会誌，**13**，216-226。
- 富山県（1979）：第二回自然環境保全基礎調査・植生調査報告書。195p。
- 内嶋善兵衛・清野 裕（1988）：植物生産力と気候条件。科学，**58**，705-713。
- UEMURA, S. (1989): Snowcover as a factor controlling the distribution and speciation of forest plants. *Vegetatio*, **82**, 127-137.

（1989年11月20日受付，1990年4月16日受理）