

国立公害研究所研究報告 第71号

Research Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan, No. 71, 1984.

リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析

Analysis on Distributions of Remnant Snowpack and

Snow Patch Vegetation by Remote Sensing

環境情報部

Environmental Information Division

土屋 巖

Iwao TSUCHIYA

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

序

環境情報の一つとして、面的な広がりをもつ一定の地域を対象としなければならないという事がある。また、環境状態は時々刻々に変化しているので、面的かつ同時的な情報の収集と処理方法の確立が重要な課題となる。国立公害研究所環境情報部では、面的情報の処理方法として、画像処理システムの開発を進めるとともに、同時的情報収集の手段として、航空機、人工衛星等によるリモートセンシング手法を環境研究に利用するための方法について研究を進めてきた。

本報告は、経常研究「衛星データによる環境情報の蓄積と解析に関する研究」及び「環境情報のデータベース作成と利用に関する基礎的研究」の一部として著者が1976年以来研究を続けているリモートセンシングによる山地残雪測定の技法を用いて、現地調査が極めて困難な多雪山地情報を収集し、雪田植物群落の存在を推定するための方法を体系化するとともに、いくつかの事例について、その手法の実用性を検討した結果を述べたものである。

本研究は、情報部で研究を進めているリモートセンシングによる植生情報の抽出方法の一部として、全国的な植生図作成の際に寄与できるものと考えられる。もちろん、複雑に混在し、変化する植生、とくに環境条件の影響を受け易い雪田植生の状態を、およそ900 kmも上空にあるLANDSATの情報のみによって正確に判読することは困難であるが、植生調査の予備情報として、また、現地調査による点の情報を面的に補かんするための方法として、植物の分布や生態の研究において利用可能であると考えられる。この分野に関係ある方々の御理解と御批判を寄せて頂ければ幸いである。

1984年3月

国立公害研究所 環境情報部

部長 廣 崎 昭 太

目 次

要 旨	1
Abstract	3
第1章 序 章	5
1.1 はじめに	5
1.2 緑の国勢調査と雪田植生	6
1.3 植生調査と空中写真	8
1.4 植生調査とリモートセンシング	8
1.5 リモートセンシングによる積雪調査	9
1.6 雪田植生の成立要因としての残（積）雪	10
1.7 研究の背景と目的	12
第2章 多雪山地の植生の特徴	15
2.1 多雪山地の概念	15
2.2 植生と大量積雪	18
2.3 原生的自然としての雪田植生	19
2.3.1 雪田植生の概観	19
2.3.2 雪田植生の環境こう配	24
2.3.3 雪田植生の保全	26
2.3.4 雪田植生と動物	30
第3章 多雪山地積雪深の算定とリモートセンシング	33
3.1 空中写真測量	33
3.1.1 積雪深算定の原理	33
3.1.2 積雪深分布図の作成	34
3.1.3 積雪深分布図の役割	38
3.2 衛星リモートセンシング	39
3.2.1 積雪探査の原理	39

3.2.2	積雪モデルの開発	44
(1)	面積	44
(2)	融雪	45
(3)	残雪深度	45
3.3	テストサイトの選定とグラントルース調査	47
3.3.1	テストサイトの必要性	47
3.3.2	テストサイトとしての鳥海山の特色	49
3.3.3	グラントルース調査	50
第4章	衛星データによる解析事例	57
4.1	衛星データの収集	57
4.2	1979年の残雪解析	59
4.3	1980～1982年の検証実験	64
4.4	ランドサット RBV による予備解析	71
4.5	ノア熱画像の補助的解析機能	76
第5章	残雪と雪田植生	81
5.1	厚い残雪と植生	81
5.1.1	亜高山針葉樹林帯の欠落	81
5.1.2	高山原生的景観としての雪田植生	83
5.2	残雪分布図と植生図	87
第6章	まとめ	93
6.1	残雪情報の意義	93
6.2	残雪と原生的自然の保全	96
6.3	展望	99
謝辞		99
参考文献		100

要 旨

多雪山地には、しばしば湿性のお花畑と呼ばれる雪田植生が見られる。雪田植生を構成する植物群落は、環境庁が設定した自然度階級最上位の自然草原に分類されているが、そのような原生的自然に対して、先取りの対策が保全のために必要であると提言している（環境庁、1976）。

近年、多雪山地において、さまざまな開発が進行しているが、雪田植生は人為的圧力に対して最も弱いものであると言われている（石塚、1972）。しかし、雪田植生の存在する多雪山地の多雪の実態については不明のことが多かったので、筆者は多雪山地の内容を検討し、従来の観測技術では直接測定が極めて困難であった、山地の広域積雪深分布の解析に衛星データを利用することを計画した。

山地の積雪は厳冬期にはその高い反射率によって、衛星データでは上限値になり深雪の区分はできない。しかし、晩春以後の暖候期になると、残雪として物理的性格が変わってゆくため、反射率も変化して低下する。厚い残雪の反射率低下が遅れることを利用して、ランドサット MSS の CCT の解析手法を開発した（土屋、1981）。

この手法によって、1979年5月の鳥海山について残雪深度階級区分図を5万分1地形図オーバーレイ仕様で試作した。指標化した区分図にはほぼ10mを超す厚い残雪の分布が示されたので、現地調査を含む多くの照合調査によって確認するとともに、1980-82年のデータに基づく追試及び月山に拡張しての数値実験によって手法の妥当性を認めることができた。

残雪分布図は、その厚い部分が環境庁作成の植生図の雪田植物群落（雪田草原）の存在地帯と一致するので、現地調査の困難な深山や山地の広い範囲について、群落の存在可能性を推定する手段として有効である。また、深度階級区分によって、群落の環境こう配の多様性のうち、積雪に関する部分の説明ができるので、群落の型や人為的圧力に対して弱い地帯の検出が可能になることを指摘した。雪田植物群落周辺の生育環境として最も重要な積雪についての質的量的情報は、従来はほとんど入手が困難であった。

衛星データの場合、精度が空中写真測量を利用した積雪深分布図より低下はするが、ほぼ植生図に適合した精度があることと、利用できる機会が多く、より広範な同時データをはるかに低い経費で処理できる特色がある。

ランドサットのMSS以外に、ほぼ倍の解像度のRBV及び気象衛星ノアの熱赤外波長帯を利用した日本列島全域概観などの予備的解析結果を示した上で、既に確立あるいは開発中の異なった機能のデータ処理システムを組み合わせる有効な残雪情報の得られることを説明した。

衛星搭載のセンサーの進歩及びデータ処理技術の向上と、容易になる利用体制の整備が予想さ

れるので、前述の保全すべき貴重な原生的自然の典型例として雪田植物群落を例にして、その先取的対策のために、衛星データが活用できることを提言した。

Abstract

In heavy-snow mountain areas, a snow patch vegetation called a hygrophilous flower meadow is often observed. The plant communities composing a snow patch vegetation are classified as a grassland which tops the grade of nature established by the Environment Agency. The agency suggested anticipating counter measures for preserving such primeval nature (Environment Agency, 1976).

In recent years, various developments have been carried out in heavy-snow mountain areas whose snow patch vegetations, which are most vulnerable to human activities, are observed (Ishizuka, 1972). Since little is known about the actual state of heavy-snow in these mountain areas, the author has planned to utilize data obtained by an artificial satellite in order to analyze the broad-area distribution of snow depth which was almost impossible to observe directly by conventional methods.

In the depth of winter, the classification of snow depth in mountain areas by satellite data is impossible because, in such data, any measurements of snow depth are placed in the uppermost class on account of the high reflectivity of snow. However, in late spring and thereafter, as the physical properties of remnant snowpack change, the reflectivity of snow decreases. The author developed a method for analyzing the CCT of LANDSAT MSS by taking advantage of the delay in decrease in the reflectivity of thick remnant snowpack (Tsuchiya, 1981).

Using this method, the author produced by the overlay method a trial map in which the distribution of the depths of the remnant snowpack on Mt. Chokai as of May, 1979 was displayed on a topographical map on the scale of 1:50,000. The distribution of remnant snowpack over 10 m deep shown on the map using indexes was confirmed by a number of verifying investigations including on-the-spot surveys. Further, the appropriateness of this method could be demonstrated by an additional investigation based on the data gathered from 1980 to 1982 and by a numerical experiment conducted with Mt. Gassan.

Since the locations of deep snow spots on this distribution map for remnant snowpack corresponds to those of snow patch communities on the vegetation map drawn up by the Environmental Agency, this map may provide effective means for estimating the possible locations of snow patch communities in broad area including steep mountains and mountainous regions whose on-the-spot surveys are hard to carry out. It has been pointed out that, of various environmental gradients, those concerning snow coverage can be explained by classifying the depths of snow, thus enabling the identification of the types of plant communities and the detection of vegetative zones vulnerable to human activities.

Although snow coverage is one of the most important factors for the growth of snow

patch communities, it has been almost impossible to obtain qualitative or quantitative data on it. Artificial satellites provide us with data which enable to make up a snow-depth distribution map whose accuracy almost corresponds to that of the vegetation map on the scale of 1 : 50,000, although the accuracy of the distribution map is somewhat lower than that by aerial photogrammetry. They also have the advantages of offering chances of frequent use and providing at far less cost simultaneous data with broader areal coverage compared to areal photogrammetry.

In addition to the analysis of the data obtained by LANDSAT MSS, preparatory analyses such as a detailed survey over the limited small area and a general survey over the Japanese Islands have been conducted using LANDSAT RBV, which has a resolving power about two times that of LANDSAT MSS, and the thermal infrared bands of NOAA, a meteorological satellite. On the bases of these analytical results, the author has demonstrated that a useful information on remnant snowpack can be obtained by combining various data processing systems which are established or under examination.

In the light of future progresses of sensors for satellites and of data processing techniques and the possible establishment of systems which will offer easier utilization of satellites, the author has proposed an application of satellite data to the advanced protection of snow patch communities which are typical examples of primeval nature to be preserved.

第1章 序 章

1.1 はじめに

世界に知られた日本の自然美の一つの中に、しばしば日本アルプスと呼ばれる中部地方の飛騨・木曾・赤石諸山脈の景観がある。夏は雨が多く湿潤熱帯並みの暑さになり、冬にはシベリア経由の気団に覆われて、日本海沿岸の地方に世界最大級の豪雪が降る。そのため、夏の日本アルプスは豊富な森林の緑の中に、谷を埋める残雪と岩峰の織りなす景観となって登山者を感激させる。

その特色は、Walter Westonの「日本アルプスの登山と探険（1896）」によって、広く海外に紹介され、志賀重昂の「日本風景論（1984）」によって、日本の山岳の美として強調された。

それからほぼ90年の間に、北は北海道から南は屋久島に至る各地の高山に登山者の数は飛躍的に増大した。それとともに進められた山岳の観光開発に伴い、さらに多数の人々がレクリエーションの場として山岳を利用する機会が増大した。かつてWestonのたたえた残雪の山々にも、除々に人為的圧力による自然破壊が認められるようになった。

しかし、登山者が増えつつあったときでも、ふもとからの長い道を徒歩だけで登っていた間は、入山者の数も限られ、目立った破壊現象は少なかったと言える。そして観光開発などによる大量輸送手段が山奥深く入るにつれて、問題は大きくなった。歩くだけの細い道ならば、積雪の少ない地盤の安定した経路が選ばれることも多かったのであるが、車やロープウェイなどのために選ばれた経路は、しばしば自然環境を無視して作られるからである。このため、積雪の多いことによって人為的圧力を免れていた山地に土木工事が進められ、大量輸送手段によって到達した人々が歩き回るようになった。

従来、山地の積雪の多いことについては、雪崩などの自然災害を心配したり、積雪を天然のダムとみなして水資源としての役割を期待する人々は多かった。しかし、積雪の量によって一種の住み分けをしていた多数の動植物に注意を払う人の数は少なかったと言える。積雪は厳しい自然環境を形成するが、同時に積雪の断熱効果は地表の凍結を防ぐなどの保護作用をもたらしたので、積雪量に対応した動植物が生存している。しかし、積雪量が多くなるにつれ、残雪が地表を覆う期間も長く、登山経路に利用される一部の残雪を除くと、真夏の残雪地帯の多くは、そこに近づくことが困難であり、科学的調査を進めることは至難であった。したがって、大量輸送手段の残雪地帯への侵入に伴う、人為的破壊の始まったときが、同時に科学的調査の可能になったときであるというようなことが起きやすくなった。

残雪が豊富にあることによって人跡未踏の地として残されていた自然が、明日は多数の観光客

の散策の地になりかねない現状では、人跡未踏のままの状態のときに、貴重な自然を区分して保護の対策を進めることが必要である。

現在、定常的に公開される衛星データを利用する技術に、衛星リモートセンシングと呼ばれるものがあり、周辺技術を含めてめざましい発展過程にある。この技術が、公開データから有用な環境情報を抽出する手段になり得ることを検証するため、広域であることも関連して、従来の技術では実現困難であった多雪山地の積雪調査と、そこに存在する典型的原生自然とされる雪田植生地帯検出の問題を取り上げた。

1.2 緑の国勢調査と雪田植生

1973年に始まった第1回自然環境保全基礎調査「緑の国勢調査」(環境庁, 1976)では、「自然は人間の手のつけ具合、人工の影響の加わる度合によって、きわめて自然性の高いものから、自然性の低いものまで、いろいろな階層にわかれて存在する」という自然度の概念を与えて、自然草原、高層湿原、高山植物、極相林などの自然植生を自然度10及び9の最上級におき、人為の影響によって以下階級を下げ表1に示す植生自然度の10区分を採用した。

自然度10と9については、調査報告書(環境庁, 1976)で「それ自体で学術的価値を持つ植生が多いとともに、開発の進んだ今日では希少な存在として相対的な価値を帯びつつある。したがって、自然環境保全の面から先取的に確保されねばならない地域である。」と表現されている。そして、高山植物の中に風衝草原及び高山ハイデと並んで雪田草原の名称が、メッシュ統計のためのコード表に示されている。

雪田草原は残雪の厚い場所で、残雪融解後の短い、時には1か月足らずの生育期間に耐え得る植生の形態であって、残雪の豊富な場所に出現する原生的自然を構成している。雪田草原には、チングルマ、アオノツガザクラ、ヒナザクラ、イワイチョウなど良く知られた高山植物を含み、ヌマガヤなどの草原の中にニッコウキスゲなどの目立つ大型の花も点在するため、しばしば湿性のお花畑と表現される。また、なだらかな斜面であると、小さな水湿地を構成しているため高層湿原として表現されることもある。

「緑の国勢調査」は、雪田の植生の重要性は指摘したが、その生態学的内容には不明な点が多い。例えば、雪田の意味である。雪田の植物群落について、山形大学石塚教授はその初期の論文で「冬季の風下斜面にある凹地には、多量の積雪が吹き溜って夏季遅くまで残り、いわゆる雪田(snow patch)を形成する。かような地では比較的積雪の多い地に生ずる諸種の落葉灌木も生育出来ず、一種の高山草原が発達する。」と述べ、特に地形が谷状である場合には、雪渓(snow valley)と呼ばれることもあるという注を付けている(石塚, 1949)。ここでは、残雪の形成過程によって雪田と雪渓を区分している。雪田型残雪に雪田の植物群落の多く見られることは理解できるが、雪渓型残雪については不明である。しかし、雪田植物群落研究の多くは、吹きだまり残雪を対象にしているので、雪田をその意味に限定し、さらに雪田そのものについての知見の意義

表1 植生自然度区分概要及び全国集計

土地利用区分	植生自然度	概要	備考	全国集計メッシュ数 (%)
I	①	市街地, 造成地	植生の殆んど残存しない地区。	11,303 (3.1%)
	②	農耕地 (水田, 畑地)	水田, 畑地等の耕作地。緑の多い住宅地。 (緑被率60%以上)	81,815 (22.7%)
II	③	農耕地 (樹園地)	果樹園, 桑園, 茶畑, 苗圃等の樹園地。	5,509 (1.5%)
	④	二次草原 (背の低い草原)	シバ群落等の背丈の低い草原。	5,857 (1.6%)
III	⑤	二次草原 (背の高い草原)	ササ群落, ススキ群落等の背丈の高い草原。	7,019 (1.9%)
	⑥	造林地	常緑針葉樹, 落葉針葉樹, 常緑広葉樹等の植林	75,140 (20.8%)
V	⑦	二次林	クリーミズナラ群落, クヌギ-コナラ群落等, 一般には二次林と呼ばれる代償植生地区。	75,521 (21.0%)
	⑧	二次林(自然林に近いもの)	ブナ, ミズナラ再生林, シイ・カシ萌芽林等, 代 償植生であっても, 特に自然植生に近い地区。	16,075 (4.5%)
VI	⑨	自然林 (極相林またはそれに 近い群落構成を示す天然 林)	エゾマツ-トドマツ群集, ブナ群落等, 自然植 生のうち多層の植物社会を形成する地区。	78,258 (21.7%)
	⑩	自然草原(自然草原・湿原)	高山ハイデ, 風衝草原, 自然草原等, 自然植生 のうち単層の植物社会を形成する地区。(⑨, ⑩ は自然性の高さにおいて同じランク)	3,862 (1.1%)
(計)				360,359 (100.0%)

(環境庁, 1976より)

を検討することも重要である。

「緑の国勢調査」では雪田草原の数・面積共に北海道と東北に多く、西日本で少ないという結果が出ているが、前述したように雪田草原と高層湿原の区分の明確でないものもあり、雪田の意味も明らかにはしていない。雪に覆われている期間は研究対象になり難いという考え方、あるいは雪についてはその分野の研究成果を活用すれば良いという見方もあるので、やむを得ない事情かも知れない。

1964年3月19日の立山室堂周辺の空中写真に基づく積雪深算出(小笠原, 1965)に対応しての植生と最大積雪深との関係表示, すなわちハイマツ=コケモモ群集で69-155 cm, ウラジロナカマド=ミネカエデ群集は203-390 cm, ショウジョウスゲ=イワイチョウ群集は623-657 cmという表現(鈴木・二村, 1966)は、初めて高山植物の分布と積雪に関する一つの根拠を提示したことになった。623-657 cmと算定した積雪のもとに典型的な雪田植生の一つの型が現れている。この

ことは、山地植生の研究に空中写真による積雪調査の意義を認め、さらに将来の空中写真測量の役割を示唆したことになる。

1.3 植生調査と空中写真

山地積雪調査で効果的に利用できた空中写真技術は、また山地植生調査でも活用が考えられた。1978年を初年度とする第2回緑の国勢調査では、第1回で全国をカバーした植生調査のほぼ2分の1に当たる地域の精密調査が実施され、カラー空中写真が活用されることになった（環境庁、1982）。

通常、カラー空中写真と表現したときは、自然のままの色彩表現をしたものという意味で、ナチュラルカラーあるいはリアルカラーを指し、代表的なものは建設省国土地理院が昭和49年度に開始し、昭和53年度には全国をカバーした平地8000分の1、山地1万5000分の1の鉛直写真である。夏から秋にかけて撮影される例が多かったが、秋の場合には山地の常緑針葉樹、紅葉する落葉樹及び草原などが微細に記録されているので、人の入り難い深山についての植生図画化作業に効果的に取り入れることができる。

実際の植生精密調査でも、現地での植物生態研究者による精密調査の結果をカラー空中写真上で検討し、それぞれの植物群落に対するカラー画像と同質のものを写真上の別の地域で判別することによって、同質の群落を検出するという方法を用いることが多い（例えば、山形県、1979）。この方法は、現在の各種リモートセンシング技術における画像解析などで実施しているものと考え方の基本は同じであり、点の情報を面に広げることにほかならない。写真からの植物群落の検出では、専門の植物生態研究者の目による経験的主観的判読が行われたのであるが、リモートセンシング技術では、通常は、判別のためのモデルを作成し、定量的な数値解析によって表現することが多いという違いになる。

1.4 植生調査とリモートセンシング

歴史的に見て、空中写真撮影の専門家が、航空機搭載型の初期のリモートセンシング装置を使う例が多かった。そのため、出力結果を空中写真作成と類似の過程で表現し、アナログ型の解析に限定されることも多く、リモートセンシングのためのセンサーの性能を十分に生かさないうままで作業が行われた。

このことは、本論文で扱う衛星によって得られたリモートセンシングデータについても同様であった。1972年7月アーツ(ERTS)の名称で打ち上げられた、面的解像度80mの多重スペクトルスキャナーMSSのデータの利用に際して、日本の研究者の多くは原データを制限した形のフィルムデータで利用することが多かった。それでも、植生の豊かな山地と開発の進んだ工業都市の緑の分布の比較や、季節によって異なる偽似カラー表示は、植生を含む地表環境の全く新しい情報になり得ることを示唆できた。

その後 1979 年 1 月の日本でのランドサット (LANDSAT: 旧名称 ERTS) の直接受信による利用拡大に至るまでの数年間に多数の試みが行われ、いわゆる衛星リモートセンシングがリモートセンシングの中心になった。植生調査に利用する例も多く、埼玉県比企丘陵を対象にした「LANDSAT データによる植生自然度」の表現では、「比企丘陵現存植生図」(建設省, 1972)と「第 1 回緑の国勢調査」(環境庁, 1976)と比較照合したメッシュ解析に反映されている(リモート・センシング技術センター, 1979)。

日本における直接受信が宇宙開発事業団によって実施されてからは、原データをひずみ補正した CCT (電算機用テープ: Computer Compatible Tape) が容易に使えるようになり、さらに地図オーバーレイ解析に便利な幾何補正の行われたものも利用できるようになって、各分野での利用が活発になった。しかし、植生調査に利用する場合でも、他の例と同じように大部分が対象物である植生からの反射信号を解析するものであった。これは、航空機搭載型の MSS 利用の場合と同様に伝統的中心技法であり、今後も発展していくものと考えられるが、筆者は全く別の観点を導入することを提案したい。すなわち、ある種の植物群落にとって関係の深い環境条件が検出できれば、自然状態のままであればその環境に適合した極相の群落が検出できるのではないかという考え方である。

筆者はかつて、昭和 48-50 年度の科学技術庁特別研究促進調整費 (特調費) による「リモートセンシング情報利用技術の開発に関する総合研究」(科学技術庁, 1976) の積雪分野を担当した。その際、山地における非常に深い積雪の探査データを解析した。ここでは山地の深い積雪を探査する技法が、山地の自然植生保全のための新しい情報表現の手段になり得ることを検討したい。

筆者がリモートセンシングデータを解析するため、グラントルースデータ (ground truth data) 入手に際してテストサイト (test site) として調査した鳥海山では、積雪の多い場所を典型的な雪田植生が占有している。もし、積雪の多い場所をリモートセンシングの技法で検出できれば、同時にそれが雪田植生の場所を検出している可能性がある。この考え方が成立するためには、積雪の区分 (深さや密度など) 検出技法の確立と、積雪と雪田植生との関係が明らかになっている必要がある。

1.5 リモートセンシングによる積雪調査

平地の積雪は別として、山地の積雪については、水資源の観点から、一般にスノーサーベイ (snow survey) と呼ばれる手法が行われていた。これは積雪の深さと密度をスノーサンプラー (snow sampler) によって測定し、測定点を線状にあるいは格子点状に拡大することによって山地の積雪水量を算定するものである。

この方法はアメリカやカナダの西部山地で広く実施され、1950 年代には日本でも実用化され、現在も北米ではサンプラーの改良を進めながら利用されているが、日本ではかなりすたれてきた。この方法は算定した積雪水量と実際の河川流出量との間に高い相関関係が成立する場合に有効に

なる。日本の場合、深さ 5 m 以上の場所が多いのに、装置の限界が通常は 5 m までであった。地形が複雑なため、点の測定値の代表性が悪いという制限があり、しかも困難な山中での作業を維持するための専門家や人員の確保が困難であったという事情もある。

人工衛星として早くから実用化された気象衛星が積雪検出に有効であることがわかってから、地形の単純な山地での積雪流出解析に使われるようになった。衛星リモートセンシングによる積雪調査の始まりである。原理は雲と同様に高い反射輝度を示す領域から移動する雲を除くか、雲がないと判定できる場合に積雪地域が検出できるという簡単なものである。当初の積雪の面積表示技術の開発に続いて、積雪の深さを表現する技術が開発されたが、1~10 km 又はそれ以上に粗い面解像度と、反射輝度表示の上限近くを使うという制約のため、検出できる深さの限界は 15~50 cm であると見られていた（例えば、Barnes & Bowley, 1968; McGinnis ら, 1975）。

このような技術的背景のもとで、筆者は前述した科学技術庁特調費による積雪調査に際して、航空写真測量の技法を適用して、鳥海山、月山及び飯豊山の 1974 年 4 月 6 日の積雪深度分布図を、特に深雪の場所について 1 万分の 1 地図に作成した（科学技術庁, 1976; 土屋, 1976）。この分布図によって、初めて最大深度が 30~45 m を超す山地がいくつかあることがわかり、その一部についての実態調査が続けられ、IASH（国際水文科学協議会）の氷河分類表（UNESCO/IAHS, 1970）に規定された小規模氷河の発生することがわかった（土屋, 1976 b, 1977 b, 1978 ab）。

その後、1978 年開始の経常研究において、この積雪深度分布図と現地実態調査をグランドトールスにした、航空機搭載型 MSS のデータ解析及びランドサット MSS のデータ解析を実施した。積雪が古くなって、さらに融雪の季節をある程度経過した時期のランドサット MSS のデータを使うと、数 m 以上恐らく 10 m 以上の深雪部分の検出できることがわかった（土屋, 1981）。降雪の季節の終わりから、さらに 1~2 か月経過した残雪を対象にすることで、表現が可能になった技術である。雪田の植物群落のように深い積雪と関係が深いとされていた植生の生育立地の検出に適用の可能性がある。

現在、水資源開発を目的にした衛星リモートセンシングの技術開発は盛んであるが、いずれも降雪季節あるいは最大積雪深の出現日近くを対象にするものが多く、無雪季節を対象とする場合は大規模な氷河の探査を目的としているものが多い（例えば、Deutsch ら編集, 1981）。山地の自然環境保全のための新しい情報として、残雪を検出し、その残雪の性格を表現することによって、多雪山地の原生的自然植生の典型であり希少価値の高い雪田植物群落の成立要因の一端を明らかにすることは、衛星データの新しい利用法であると言える。

1.6 雪田植生の成立要因としての残（積）雪

前述したように（pp. 6~7）、雪田植生に関しての表現には不明確な部分が多い。例えば、生育している山地によっては高層湿原に分類され、あるいは、風衝草原の名称の中に含まれたりする。植生の生態的表現も雪田植物群落以外に雪田草原の語も使われている。これは、雪田植生に

ついでの研究がまだ体系化していない部分がかかなりあることと、特に生育立地として重要な雪田と表現されるものの内容がよく調べられていないことに関係があるように思われる。

もし、暖候期の融雪量を越すほどに積雪が非常に深くなって、地表が現われないとしたら高等植物の生育は無理であるし、積雪が少なければ雪田植生の名に値する植生以外のものが生育するはずである。少ない調査例であるが、オーストリアの調査では、地表が現われた生育期間がわずか2週間前後でも根茎の生長が測定できた例がある(Masuzawa, 1977)。そして、もし、山の積雪が年々同じであれば、雪田植生の占有する場所も安定しているかも知れないが、山地の積雪を調べてみると年々の変動はかなり大きく、特に典型的な雪田植生の生育しているような、残雪凹地と表現される地形での、積雪の年々変動は思いのほか大きい。筆者が、鳥海山や月山で調べたところでは、最深積雪の深さの最大年と最小年の差は同じ場所でも5~10 mに達する(土屋, 1977b)。

石塚(1948)が既に指摘したように、雪田における土壌の性質や群落の組成は、積雪期間の長さとの関係が深い。積雪深5 mの違いは場所にもよるが、月山や鳥海山の高度1,600 m付近で積雪期間にして30日又はそれ以上の違いに相当する。10 m 増えれば、60日以上も積雪期間が長くなるため、雪田中心近くの植生の中には、年によっては葉芽を準備したままで、花を咲かせることはもちろん、葉を広げることもなく次の年に開花を期待することになることさえある。実際にそのような状態を植物生態学者が確認する機会は思いのほか少ない。山に新雪の季節が到来する10月に、まだ厚い残雪に覆われた植生を見いだすことは容易なことではないからである。この逆の現象もあるが、それも10月頃、運良く初雪が解けた穏やかな好天に、例年より1か月早く消失したような雪田中央部に行くと、全く違った光景を見ることになる。1955年、その中央部が消失する年は極めてまれであるとされていた月山の大雪城(おおゆきじろ)万年雪が完全に消失したとき、雪田植物群落の同心円状の分布の典型が観察された最初になった(p. 20図1参照)。中心部に無植物帯があり、その外側に組成の異なる群落が順に成立していることが報告された(結城, 1974)。

無植物帯があることは、積雪が植生存在の阻害要因となることを示しているが、積雪の融解による水分補給は植生にとって重要な育生要因になる。したがって、積雪がある程度以上あって、比較的短い積雪消失期間に適した植物が、雪田植物群落を構成することも表現できる。しかし、このある程度の積雪についての量的知見は極めて少なかった。さきに紹介した立山の例(p. 7)は、わずか1回のそして空中写真利用による判読である。積雪の年々変動、そして雪田植生として典型的な構成をしていたか否かの吟味によって、ある程度の積雪の意味を明らかにする必要がある。しかし、少なくとも5 mを越す積雪を測定するのは容易なことではない。筆者がこれまで進めてきた積雪深あるいは残雪深を算定する方法には、空中写真測量や衛星リモートセンシングに基づく消雪モデルや実測による吟味が総合されており、雪田植生の主要環境因子としての積雪の量的表現を可能にする。

したがって、筆者の調査フィールドにしていた鳥海山や月山の雪田植生についてのいくつかの研究成果（石塚ら，1972，1975；結城，1974）と照合することで、雪田植生の環境要因の一部をより定量的に表現することができるはずである。

1.7 研究の背景と目的

現在、国立公害研究所では、主として環境情報部で、ランドサット等の衛星データを環境情報として利用することの実用可能性に関する研究が進められている。環境情報として利用するためにデータが定常的に入手できること、データの精度が安定していること、データ処理の技術が安定又は常に改善の方向にあり、周辺技術の確立が予定されていることなどさまざまな条件を考慮する必要がある。衛星データの中でも、ランドサットについては、1979年1月以後日本における受信態勢の整備に伴い、前記条件が年々改善されてきた。したがって、ランドサット等の衛星データを環境情報として利用するための技法の開発も次第に軌道に乗りつつある。その中に、データを処理して得られた情報を地図上にオーバーレイ仕様で表現する方法がある。

地図オーバーレイの技法は次の事情によって開発された。1976年7月29日、夏としては珍しく大気透明度の良い快晴の天気のもとで、霞ヶ浦水質観測が実施された（国立公害研究所，1977）。この日、偶然の一致であるが、ほぼ観測開始に近い時刻に、ランドサット2号が日本上空を通過していた。さらに当時は、日本上空を通過して地表を探索したもので、CCT（電算機用テープ）の形で利用できるものは非常に少なかったにもかかわらずCCTを入手できた。このCCTに基づき、原データの幾何的補正によって、地図上のデータの位置を確定し、さらに地形図上に表現するための技法を開発した上で、湖水全域の水質表示を少数の実測値から算出表示した（土屋ら，1980）。

この開発作業の終わるころ、日本におけるランドサット直接受信態勢が整備され、データ処理技術の改善によって、地図オーバーレイ可能なCCTが宇宙開発事業団から提供されるようになった。また、入手したCCTを用いて、各種モデルに基づく演算結果を大型の地図サイズで出力するための、いわゆる周辺機器も所内に整備された。このことによって、かなりの量のデータが、比較的に多い回数で一定の規準で処理できることになった。これは、衛星データが環境情報としての利用可能性を吟味できる価値を示したことになる。その事例として、前述したように山地積雪と雪田植生に関連した、衛星データの解析技法の開発研究を実施した。

雪田植生は、前述したように積雪の量と関係の深い原生的自然植生であるが、その積雪との量的（例えば最深積雪深など）関係については限定された場所でのわずかな事実しか知られていなかった。雪田植生の生育立地条件に関連する積雪を調査するために、もし、衛星データが、何らかの有効な情報を提供し得るとすれば、衛星データを解析する意義が認められることになる。

衛星データの入手は、ランドサットの場合、2，3号で18日に1回の割で可能である。1979年5月4日と22日の2回のデータによって、暖候期の積雪面積の縮小過程の解析ができた。いわば、

山地残雪の消失モデルが作成できたことになるが、さらにランドサット MSS の特色を利用した深度指標モデルを加えて、残雪深度分布図の 5 万分の 1 地形図オーバーレイ多色印刷の試作を行い、鳥海山全域の残雪分布を表現した（土屋，1981）。

この残雪分布図（図 24，巻末折込み地図）の精度を検証する過程で、第 2 回「緑の国勢調査」の現存植生図（環境庁，1981）と照合したところ、残雪の深い所（図中の 5 月 22 日現在約 10 m 以深）が、高山帯自然植生の雪田草原に区分された領域とほぼ一致することが認められた。この場合は、深い残雪の検出が同時に、雪田植生地帯を検出したことになり、保全対策のための基礎的資料になり得ると考えられる。

この研究では、開発した残雪調査のための技法を、1980～1982 年のランドサットデータ、及び鳥海山のテストサイトにおける地形、土壌、植生等の現地調査によって検証し、また雪田植生の立地条件を規制する重要因子としての積雪に関する量的知見を得るための各種衛星データの利用可能性の検討を進めた。さらに探査の重点を融雪季節の残雪に置くことによって、雪田植生地帯の検出だけでなく、その他の植生に関して、また山地自然環境保全のために有効な情報として使用できることの可能性を吟味した。

第2章 多雪山地の植生の特徴

2.1 多雪山地の概念

日本海に面した、山陰・北陸・東北の山地に雪の多いことは良く知られている。しかし、そのような山地を多雪山地と表現したような場合、どの程度の積雪をもって多雪とみなすかということになると、具体的な根拠を論じたものはあまり見られない。しかし、それぞれの研究目的によって区分を与えたものはある。

例えば、太平洋側と日本海側の森林構成樹種の違いを、気象観測施設等の資料に基づいて、平均最深積雪量の50~100 cmを多雪境界にすることによって説明したものがある(高橋, 1960)。また、環境庁の第2回緑の国勢調査に関する報告書(環境庁, 1982)では、動物の生態に関連して、ニホンザルについて次のように表現している。

- ① 多雪地域(150 cm 積雪深日数 50 日以上)の地域はニホンザルの分布に直接の制限を与えない。しかし、多雪地域で亜寒帯林がある場合は、ニホンザルの分布は制限される(例外、朝日岳東斜面、岩菅山周辺)。
- ② 亜寒帯林は明らかにニホンザル分布の制限要因の一つであって、深い積雪がみられない地域でもニホンザルの分布を制限する(例:北上山地、富士山、八ヶ岳、御嶽山)。
- ③ 深い積雪のない地域では、亜寒帯林でもニホンザルの分布が見られる(例:赤石山脈、木曾山脈、金峰山)。これは深い積雪がニホンザル分布をある程度制限する働きをもつということを示すとともに、これらの地域の他の環境要因(例えば、亜寒帯林といっても北陸、東北地方のものに比べると、その種組成が異なるといった植生上の、あるいは気温の高さなどの気候上の要因)の多雪地域との相違を示すものとも考えられる。
- ④ 森林率に示される人為的影響は、ニホンザルの分布を制限する最大の要因である。ニホンザルは森林率の低い区画(森林3)でも見られるが、それらの地域での生息率は極めて低く、このような環境は、ニホンザルの分布を確実に制限している。

これらの記述は積雪と植生とが複合して、ニホンザルの分布を規制していることを、積雪日数を指標化して示すことのできる例であるが、さらに、ホンシュウジカでは積雪深45~50 cm、エゾシカでは60 cm以上、イノシシでは30 cm以上が制限要因になることを示している。

この場合も、气象台や測候所等の測定施設の記録によって、指標が作成されているが、実際に動物の動き回る山中の真の積雪深またはそれに近いものについては、利用できる記録はほとんど無いといって良いほどである。一般に、公式記録である測定施設の観測値は、人の手作業によって得られているので、人の居住可能な場所に限定され、冬季の無人の山中の積雪深は公式記録と

しては発表されることがない。しかし、人の住まない、あるいは住めない山中の、原生的自然における実際のあるいはそれに近い積雪の状態をできるだけ詳しく知ることが、その場所の動植物の生態を知るために必要である。そしてそれら動植物を含めた自然の保全のためにも必要なことと考えられる。また、そのための順序として、少しでも従来より有効な積雪情報を得ることも取るべき手段の一つになり得るはずである。

さきに紹介した立山の植生と積雪に関する報告(小笠原, 1965; 鈴木ら, 1966)は、空中写真に基づく判読算定であり、平年値ではないが、雪田の植物群落に対して6 m以上の積雪深を推定している。もし、このような算定例、あるいは実際の測定例が多数集れば、多雪についてのさらに詳細な階級区分的表現が可能になる。筆者が、さまざまな手法で、1972年以来調査を続けてきた鳥海山や月山の典型的雪田植生地帯では、10 m以上の積雪深の場所がかなり多いことを見いだしている(例えば、土屋, 1976 b, 1981)。このような大量積雪の現象が各地で発見されているので(樋口, 1979; 若浜・山田, 1979)、多雪についての概念を再検討することが必要である。

いわゆる多雪山地を動植物の生態とは別に、景観の面でみたとき、夏山の残雪現象がある。Westonが感激し、今、登山者が夏山の美の一つに数える残雪は、降雪季節の終わり頃、すなわち最深積雪になる頃にどの程度の深さであったろうか。山の高さや緯度によって変わることは想像できるが、夏山の残雪発現のための最深積雪深の下限について、議論のための観測資料はほとんどない。山岳測候所や委託気象観測施設のわずかな資料から推定すると次のとおりである。

日本における積雪の気象官署最深記録は、伊吹山(N 35°25', E 136°24', 高度 1,376 m)の1927年2月14日の1,182 cmである。この積雪は3月末にほぼ10 mになり、4月下旬には5 m以下に、そして5月下旬には消失した(久保田, 1983)。つまり、10 m程度の積雪では6月まで残らないのではないかという推測が成り立つ。しかし、緯度が北になると、さらに少ない積雪でも長く残ることになる。

例えば、山形県のほぼ中央にある月山の東麓で豪雪地帯として知られる大蔵村肘折の委託気象観測所(N 38°36.5', E 140°10.0', 365 m)の記録によると、1974年2月に470 cmの最深積雪になった後、積雪が消失したのは5月22日であった。山地の高度が上るにつれて、最深積雪の時期は3月の後半になるし、同じ積雪深でも残雪が消失するのは、5月から6月にずれ込む。

しかし、同年4月6日、月山の山頂から東の斜面約6 km²について、航空写真測量によって作成した積雪深分布図(土屋, 1976)に表示された5~10 mの積雪は7月にはほとんど消失していたことを、当時、筆者の指導のもとで月山の万年雪を研究していた、東海大学の学生安藤務君の説明によって知ることができた。

わずかな参考例ではあるが、北緯40度前後高度2,000 m以下程度の山地では、7~8月の残雪は、少なくとも最深積雪が10 m以上の場合に発現し得ると表現できそうである。したがって、7~8月の残雪を多雪の定義のための条件とすると、その場合の積雪の最深は10 m以上ということになる。

積雪深の測定技術については後述するが(第3章)、山地の積雪深を広い範囲にわたって、地形図の等高線のように表現するのは非常に困難である。山岳気象観測施設の測定値は数少ない点の記録であり、面としての代表性はあまり期待できない。スノーサーベイ (snow survey) の名称で、山地の積雪水量を測定する技法では、深さ 5 m 近くで技術的難度が増加して、山中を移動する線上測定の量が少なくなり、人件費と精度の面でも 5 m 以上は事実上不可能になる。この場合、直接測定の技術的限界を条件にしたとき、多雪山地の基準に 5 m 以上の最深積雪を使うことができる。

今までに多雪についての表現上の基準になるような現象を説明してきた。植生、動物の生態、景観、直接測定の技術的限界などそれぞれの対象によって多雪の意味が異なってくる。この論文では、山地自然環境のうち自然度の高い原生的自然植生の中から雪田植生に重点を置き、雪田植生の周辺について得られた衛星データの活用を主な目標にしている。したがって、多雪の意味も雪田植生の観点から定義する必要がある。しかし、雪田植生と積雪についての数量的知見は極めて少ない。さきに示した立山の例では高度 2,450 m において、典型的雪田植生では 6 m を超える積雪深が算定されているが(小笠原, 1965)、さらに高度の低い場所に同様の雪田植生が発現する場合には、さらに深い積雪深が推定される。6 m を超える積雪深は、直接測定では技術的に困難であるため、写真測量が次善の手段となる。そして、その一例として筆者は 10 m 以上の積雪がかなりの範囲に存在し、また 10 m 前後の積雪でも盛夏の候までに消失することを説明した。10 m 前後の積雪ならば植物の生育の可能性が考えられることになる。ただし、10 m 前後の最深積雪が平年の発現する山地の植生についての知見が得られるようになったのは 1950 年代以後である。

月山における大規模な集中調査(山形県, 1956, 1957)、北アルプス黒部川周辺の水資源的調査における航空写真測量の検討(小笠原・藤平, 1966)などによって、10 m 以上の積雪地帯が日本海に面した豪雪の山地に広く存在していることが次第に明らかになってきた。しかし、このような大量積雪の実態は積雪についての知見を必要とする水文学その他の多くの分野にあってもあまり知られていない。そのため、次節に述べる亜高山帯針葉樹林の欠如についての原因をめぐって、多雪による強大な雪圧説に対して、多雪そのものは認めてもその役割についての批判的見解を示す例が、植物生態学者の中にいくつかあるほどである(例えば、鈴木, 1957; 鈴木・二村, 1966; 高橋, 1960)。これは積雪が 5 m から 10 m に増加する場合、日本海沿岸のような比較的湿った雪では極端に密度が増加しているという事実が、十分に理解されていないためと思われる。10 m 前後の積雪の密度を測定した例はそれほど多くないが、いずれも 0.5~0.6 を超え、いわゆる firn の密度になっている(例えば小笠原ら, 1956; 中川ら, 1976)。

この論文では、本来なら亜高山帯常緑針葉樹林帯が存在すべき地帯に、多雪のため雪田植生の発現することを重視している。したがって、今までに述べてきた多雪に関する何種類もの認識の中から、5~10 m 以上の深い積雪が、少なくとも植生の一つのまとまりとして認識される 1 ha 以上の規模をもって、かなり多数存在する場合を多雪現象とみなし、多雪現象の見られる山地を多

雪山地として扱うことにする。なお、多数とは数 10 以上あるいは面積に換算して数 10 ha 以上の場合を考えたい。

2.2 植生と大量積雪

植生の垂直分布帯は、温度を要因にした環境こう配による区分として表現できる。例えば、沼田 (1971) の区分では表 2 のように示される。

表 2 中部日本の植生の垂直分布帯

分布帯	相	観	群集あるいは群団	対応する気候帯
高山帯	上部	草原, 荒原	コメバツガザクラ-ミネズオウ群集 コマクサ-タカネスミレ群集	寒帯
	下部	常緑針葉低木林	ハイマツ-コケモモ群集	
亜高山帯	上部	落葉広葉低木林	ダケカンバ-ミヤマハンノキ群集 ミヤマナラ群集	亜寒帯
	下部	常緑針葉樹林	アオモリトドマツ群集 コメツガ群集	
山地帯	上部	落葉広葉樹林	ブナ群団	冷温帯
	下部	落葉広葉, 常緑針葉樹林	ミズナラ群集 ツガ群団	
丘陵帯	上部	落葉広葉, 常緑針葉, 常 緑広葉樹林 (照葉樹林)	モミ-シキミ群集 カシ群団 クマシデ群集	暖温帯
	下部	常緑広葉樹林 (照葉樹林)	シイ群団 タブ群団	

(沼田, 1971より)

ここでブナに代表される山地帯上部の落葉広葉樹林の上に亜高山帯の常緑針葉樹林が現れ、アオモリトドマツやコメツガなどがその例であるとしている。しかし、日本海に面した月山・鳥海山・朝日山地などでは、この常緑針葉樹林を欠いて、その上の落葉広葉低木林（ダケカンバやミヤマナラなど）あるいは高山帯のハイマツや高山草原へとわずかな距離のうちに移行してしまう例の多いことが古くから知られていた。亜高山帯の常緑針葉樹林の欠如現象の説明には、1)強い冬季の季節風による生育障害、2)大量の積雪による生育障害 の2説があったが、実証的調査をした四手井 (1952, 1956) は多雪による強大な雪圧が常緑針葉樹林欠如の原因であるとした。彼の見解は

- 1) 季節風による機械的な風害
- 2) 季節風による温度低下, 蒸発の促進による間接的風害
- 3) 多雪による生育開始初期の温度低下

4) 残雪多量による生育期間の短縮

5) 多雪による雪圧増加の雪害

について、一つずつ検討した上で、亜高山帯の針葉樹がハイマツのような匍伏形を示さないことに注目して、次のように説明した。

「この地方（月山・朝日山地）の針葉樹林帯に分布する主な樹種はアオモリトドマツであり、所によってはコメツガが混生するか又はコメツガ林になっている所もあるが、これらの針葉樹種が匍伏形をとり得ないとしたら、針葉樹林帯の欠如は多雪による強大な雪圧が原因しているといつてよいことになるであろう。」

つまり、検討要因の1)～4)では不十分であり、5)の雪圧が主原因であることを主張した。

なお、四手井が1952年の論文で提案した偽高山帯の名称は、この針葉樹林帯の欠如した部分に現れたハイマツや草原帯に対応するものである。この名称は、現在でも東北地方の山地植生の説明には良く使われている。そして草原帯を構成する雪田植生の存在がこの偽高山帯の特色である（例えば石塚、1966）。

四手井（1956）の論文では、月山における積雪調査結果（山形県、1956）が考慮されたが、この積雪調査には四手井も参加しており、9 mに及ぶ積雪断面の掘削、さらに厚い積雪深の推定などが示されている。

2.3 原生的自然としての雪田植生

2.3.1 雪田植生の概観

前章で景観的に説明してきた雪田植生について、生態学的な概観をする。

雪田植生 snow patch vegetation については、例えば「山頂やりょう線に近い雪の吹きだまりの場所に発達している植生で、いわゆる湿性のお花畑となる。多年性草本・小低木が主で、遅い融雪の後に速やかに生長し開花・結実する生育型の植物が多い。例：イワイチョウ・チングルマ・ショウジョウスゲなど。」（生態学辞典、筑地書館、沼田真編、1974）という説明がある。

雪の吹きだまりは、その大部分が夏の間には融解消失する。しかし、筆者の調査（土屋、1976）では、月山や鳥海山の雪田植生の見られる1,400～1,900 mの高度でほぼ30 m以上の最深積雪になる場合、越年して翌年以降、時には数年間残存することがあり、しばしば万年雪と呼ばれる。万年雪という表現の起源は明確でないが、江戸時代末期には使われていたらしい。月山の大雪城万年雪などがその例であり、出羽三山修験道における登山経路になっている。万年雪とは言っても、降った雪がそのまま永久的に残存しているという意味ではなく、夏になっても消えない残雪があるという意味で使われていると推定したい。

降雪の季節が終わるところから積雪の融解が多くなり、晩秋の新積雪の時期まで積雪はその面積も深さも減少を続けるが、その晩春から晩秋にかけてを残雪期間とすると、万年雪は残雪期間の終わりになお存在している残雪と表現することができる。残雪の深さは残雪期間の始まりにおい

て大小さまざまであり、深いほど消失時期は夏から秋へと遅れてくるが、雪田植生は残雪消失の時間的推移に適応して発現する植生の一種で、残雪消失期間の比較的短いものに対応すると理解できる。

残雪消失期間と雪田植生の型との関係を詳細に調べたものは知られていないが、残雪消失期間を定性的に考慮し、あるいは地形条件に重点を置いた立地環境から検討したものはいくつかある。

石塚(1966)は、雪田植生を湿原型、ヌマガヤ型、岩礫地型の3型に分類した。湿原型は低凹地や沢筋の融雪後も常に水分の多い立地環境に成立し、ユガミズゴケやホソミズゴケなどミズゴケ類を伴うことが多いとされる。ヌマガヤ型は融雪期や雨期以外はかなり乾燥する場所を占め、岩礫地型は季節性湿性の最も著しい岩塊堆積地や岩礫斜面を占める型であると説明している。季節性湿性については残雪の消失期間が関係するが、残雪量や消失期間の年々変動はかなり大きいので、定量的な説明が得られるだけの観測資料はまだ蓄積されていないものと考えられる。

残雪の消失期間と雪田植生の関係を典型的に観察した例として、前述の月山の大雪城万年雪が消失した1955年の夏と秋における調査に基づいた結城(1974)の報告がある。図1はそれを示したものであるが、通常は万年雪に覆われて地面の現れない部分が無植物帯(肉眼観察による)で

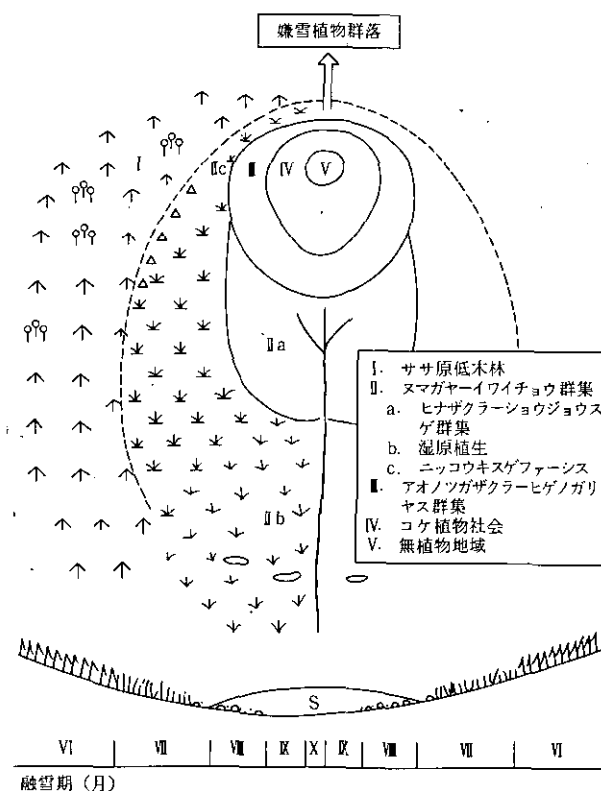


図1 月山雪田植生模式図(結城, 1974より)

あり、それより漸次外側に向かって藓苔類から次第に乾燥型あるいは嫌雪的と表現されるハイマツ群落に至るまで、残雪消失期間の短いものから長いものへと対応したリング状分布を明らかにしている。

ここで、しばしば湿性のお花畑として登山者の眼を楽しませるのはIIの型が中心であり、7～8月の登山シーズンに開花期を迎える。その内側のIIIにはアオノツガザクラが目立つ植物となって、前述の岩礫型に相当するが、人によって残雪荒原と表現する例（例えば田辺，1975）がある。残雪荒原は植生が極めて貧弱な岩礫地帯が消失時期の遅い残雪に隣接して発生していることに対して表現されており、白馬大雪渓周辺が例示されているが、月山や鳥海山の岩礫型では植生はかなり豊富である。岩礫型と残雪荒原の違いには、残雪の内容の違い、例えば残雪荒原は谷筋などの雪渓に、岩礫型は吹きだまりの雪田にそれぞれ関係が深いと考えることも可能である。いずれにしても残雪の消失が8月になって始まる部分の植生は貧弱になるが、ほとんど無植物の地帯が増加するので、8～9月の2か月間に残雪面積が急に減少する場所では荒原の印象が強い。緩やかな

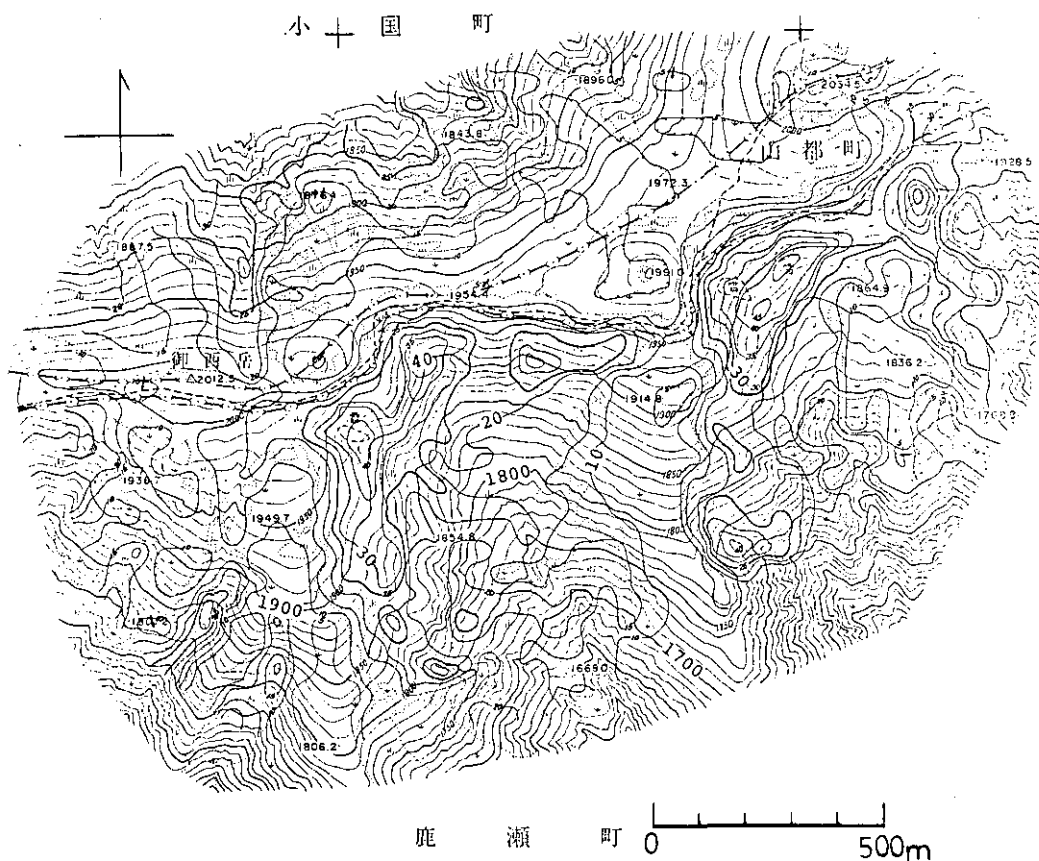


図2 飯豊山御西岳周辺の積雪深 (m)
(1974年4月6日) (土屋, 1976bより)

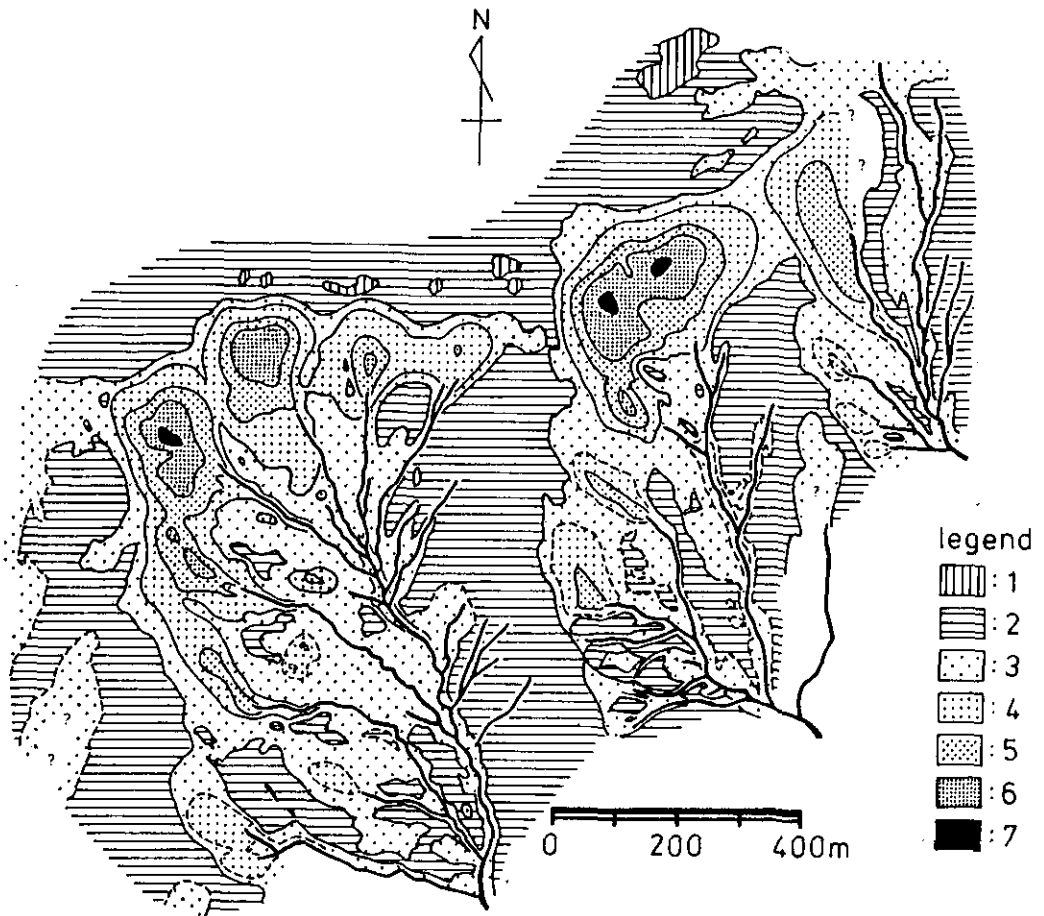


図3 残雪分布図（飯豊山御西岳周辺）

1：冬季ほとんど積雪のない地域（推定） 2：6月までの消雪域（1977年の場合，以下同じ） 3：7月上旬の残雪域 4：8月上旬の残雪域 5：9月上旬の残雪域 6：10月中旬の残雪域 7：1972年10月19日の残雪域（山中，1979より）

減少をする所では植生の貧弱な部分の割合が小さくなるため，荒原状の部分は少なくお花畑の続きがあるように見える。東北から北に雪田植生として認識される地帯が多いことの原因となっていることが考えられる。

残雪消失期間と植生との関係を，ある年次に限定しての調査であるが，かなり詳細にまとめたのは山中（1979）である。彼は，筆者が大量残雪地帯を地図化した飯豊山御西岳付近について（土屋，1976b），次に示すように雪窟地形または残雪凹地に伴う植生図として表現した。

図2は1974年4月6日の残雪深分布図である。1973/74の冬は東北地方に大雪をもたらし，いくつかの観測地点で観測史上最大の積雪を記録し（仙台管区气象台，1974），山地の積雪も非常に

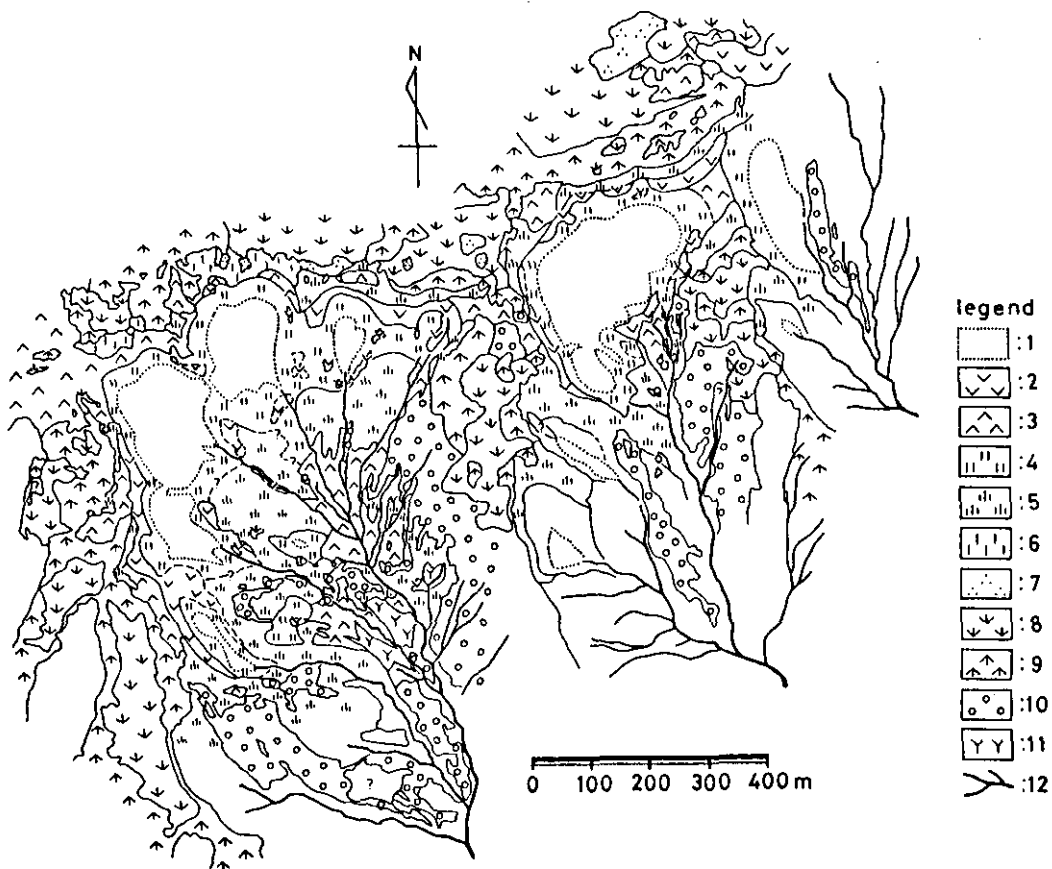


図4 植生分類図（飯豊山御西岳周辺）

- 1：裸地（残雪砂礫地） 2：アオノツガザクラ群落，チングルマ・マルバウスゴ群落 3：ショウジョウスゲ・チングルマ群落
 4：ハクサンオオバコ群落，ハクサンボウフウ群落 5：ヌマガヤ・イワイチョウ群落，イネ科草本（ヒゲノガリヤス？）群落・高茎草本群落 6：ハクサンイチゲ群落 7：風衝地植物群落
 8：ハイマツ群落 9：チシマザサ群落 10：ミネカエデ・ナナカマドーチシマザサ群落，ヤハズハンノキ群落 11：ミヤマシシウド群落，フキユキノシタ群落，12：主な水系（山中，1979より）

多かった。したがって、この図に示した積雪量は平年的なものではないが、雪窟地形と表現される凹地形上の吹きだまり残雪の平年的分布の傾向は一致するといえる。このことは図3の残雪分布図の季節別残雪分布によっても確かめることができる。残雪の多い場所は、図4に示すように2～5の区分番号をつけた雪田の植物群落によって、リング状に囲まれて残雪砂礫地として表現されている。なお、図5はこれら残雪砂礫地を雪窟として表現した断面模式図である。

山中の論文は、雪窟地形の形成メカニズムの研究に重点があり、植生調査は、関連する地表環

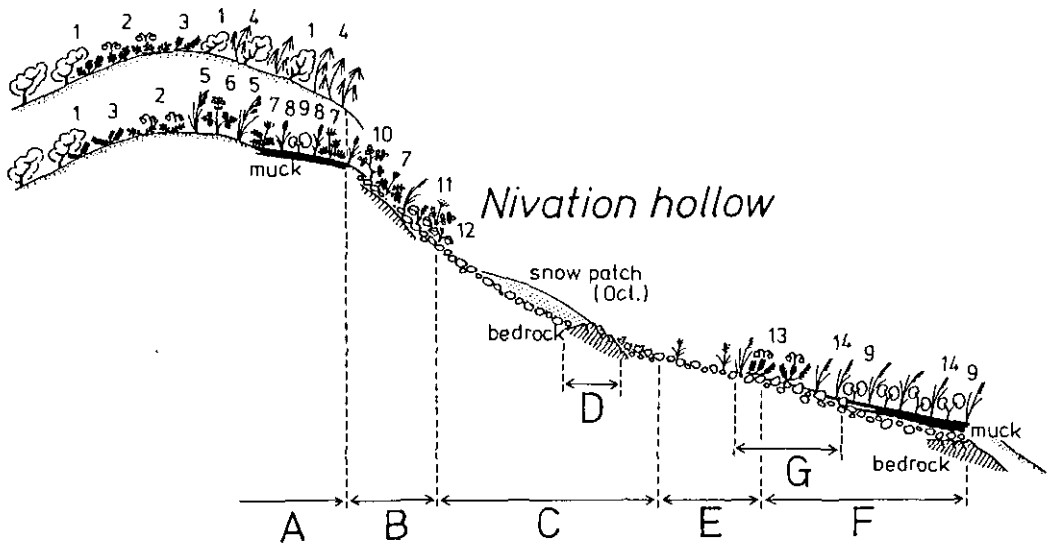


図5 雪窪の模式縦断面と雪窪の各部で作用している営力

植物—1:ハイマツ 2:コメバツガザクラ 3:ガンコウラン
 4:チシマザサ 5:コタヌキラン 6:ハクサンイチゲ 7:チ
 ングルマ 8:ショウジョウスゲ 9:イワイチョウ 10:マル
 バウスゴ 11:ハクサンボウフウ 12:ハクサンオオバコ
 13:アオノツガザクラ 14:ヌマガヤ

雪窪の各部で作用している営力(雪窪の範囲はB~E)—A:
 地表面の削はくし又は微弱。B:微小崩壊, 弱い雨食・融雪
 水食・残雪匍行による削はくと礫の移動。C:雨水・融雪水
 のシート・ウォッシュ〜リル・ウォッシュ, 微小泥流, 残雪匍行
 による基盤の削はくと礫の移動。D:残雪匍行による基盤岩の
 破碎・削はく。E:シート・ウォッシュ〜リル・ウォッシュ(細
 粒物質の洗い出し)。F:ガリー侵食, ガリー以外のところでは
 地表面の削はくし又は微弱。G:ガリー以外で布状流による
 細粒物質の堆積。(山中, 1979より)

境要因の一つとして行われたものであるが, 大量残雪地帯に典型的な雪田植生地帯が発現することを示す結果にもなっている。

2.3.2 雪田植生の環境こう配

大量積雪現象と植生, その中で特に雪田植生との関係について, 概観的研究が前述のように進むのと平行して, 植物生態の専門家による雪田植生とその周辺環境要因に関する体系的研究も進捗しつつあった。

石塚ら(1972)は八甲田山その他の山地における多年の雪田植生の研究の後, 鳥海山の調査結果に基づき, 雪田植生を構成する種々の群落の立地条件に関して, 融雪期, 岩礫量と礫移動の程度

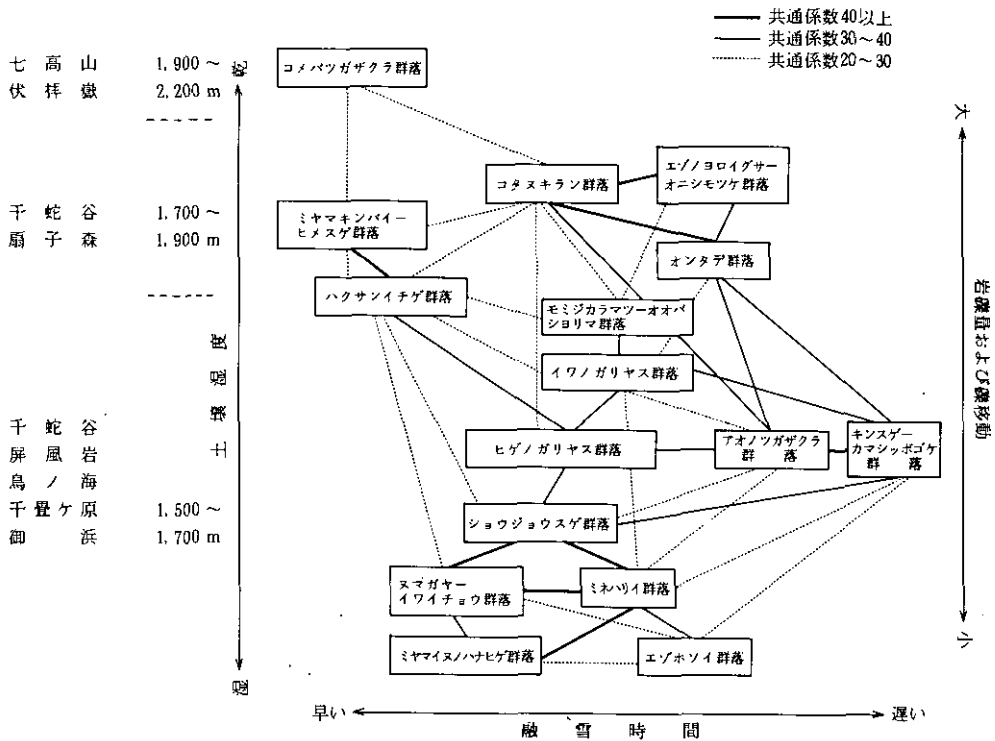


図6 環境こう配に沿った群落配列の模式図—風衝及び雪田植物群落(石塚ら, 1972 より)

(立地の安定性), 土壌湿度などを環境こう配と表現した上で, それら環境こう配と群落との関係について図6に示す模式図を作成した。

これには, 岩礫地型雪田植物群落として, (1)オンタデ群落, (2)コタヌキラン群落, (3)モミジカラマツオオバシヨリマ群落, (4)イワノガリヤス群落, (5)ヒゲノガリヤス群落, (6)アオノツガザクラ群落, (7)キンスゲーカマシツボゴケ群落をあげて, それぞれの立地環境を説明し, またヌマガヤ型雪田植物群落として, (1)ショウジョウスゲ群落, (2)ヌマガヤイワイチョウ群落, (3)ミヤマヌノハナヒゲ群落, (4)ミネハライ群落, (5)エゾホソイ群落についてもそれぞれの立地環境を説明した上で, 4種の風衝地群落を加えて, 群落の類似度をJaccardの共通係数 (Greig-Smith, 1983) によって検定した結果 (表3) が考慮されている。

雪田植生と表現されているものの一部であっても, 残雪と地表との組合せのわずかな違いが, しばしば微妙な平衡関係の上で, さまざまな種類の群落を成立させ, 原生的自然を構成していることが理解できる。

石塚ら (1972) の説明では, 鳥海山に湿原型の雪田植生が観察されなかったため, 環境こう配の模式図の中に入れられなかったが, 月山には湿原型も多く存在する。しかし, 同じメンバーに

表3 植生群落間の共通係数

群落型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1		25	23	27	17	17	10	10	11	20	13	17	10	15	10	7
2			48	24	16	8	15	11	13	9	20	11	12	8	8	6
3				21	14	9	20	21	21	21	35	27	27	15	13	9
4					41	42	23	31	35	39	23	19	13	16	11	9
5						30	22	19	17	18	16	4	4	2	4	0
6							18	25	30	29	14	9	6	9	9	11
7								40	19	23	23	13	9	13	6	11
8									33	28	30	25	19	20	17	21
9										46	27	32	21	25	20	23
10											34	28	24	21	18	11
11												37	37	27	24	19
12													51	45	31	23
13														46	33	16
14															52	30
15																23
16																

1: コメバツガザクラ群落 2: ミヤマキンバイーヒメスゲ群落 3: ハクサンイチゲ群落
 4: コタヌキラン群落 5: エゾヨロイグサーオニシモツケ群落 6: オンタデ群落
 7: モミジカラマツーオオバショリマ群落 8: イワノガリヤス群落 9: キンスゲーカマシッポグケ群落
 10: アオノツガザクラ群落 11: ヒゲノガリヤス群落 12: ショウジョウスゲ群落
 13: ヌマガヤーイワイチョウ群落 14: ミネハリイ群落 15: ミヤマイヌノハナヒゲ群落
 16: エゾホソイ群落
 (石塚, 1972より)

よる月山の植生調査では (石塚ら, 1975), 雪田・湿原植生の配列と分布を扱い, 大雪城雪田, パラモミ沢雪田, 弥陀ヶ原湿原及び念仏ヶ原湿原を対象にして, 群落組成を説明しているが, 湿原型雪田植物群落としての整理はない。雪田植生を研究する専門家の間でも見解の異なる例も紹介されており, 湿原型雪田植生については, まだ十分な検討の進んでないことが推定できる。

後述の筆者の解析事例では, 鳥海山をテストサイトとし, 月山をそれとの比較あるいは鳥海山について開発した技法を検証する対象にした。したがって, 月山の雪田植生とその比較を示す場合(p. 53), 湿原型雪田植生と明示せず, 鳥海山の調査地区に比べてより一層湿润環境であるか否かという形で表現することにした。

2.3.3 雪田植生の保全

植物生態学の見地から, 雪田植生保全の問題を論じたものに, 越後三山・奥只見周辺の植生に関するもの (宮脇ら, 1968), 八幡平についてのもの (橘, 1972) などがあるが, 石塚ら (1972) は鳥海山の調査に際して, 特に植生保護を目的に入れた研究を進め, キャンプ地等の人為的植生破壊を概観し, 他の山地との比較によって, 鳥海山の森林限界は, 海拔 1,050~1,200 m で, 他の山地に比べて格段に低く, この高度より上の (いわゆる偽高山帯と高山帯) 植生は, いずれも多

雪や風衝をはじめとした、極めて厳しい環境のもとに、ようやく成立を許されている低木林や草原であると説明した。そして、矮性ブナ林の発現する高度でもあることを指摘した上で、それ以上の地域は、低い標高にもかかわらず、太平洋側高山の高山帯や亜高山帯上部と立地的にほぼ等しいのであって、これらと同様に原生保護地域としての取り扱いが必要となると説明した。そして、多雪山地の植生と景観を特徴づける雪田草原は、尾瀬などのような一般の高山の湿原よりもさらに「弱い」植生である点に注意すべきことを強調している。

ここで景観的に雪田草原と表現した植生地帯における人為的破壊は、近年、夏スキーの流行によっても目立つようになった。石塚ら(1975)は、夏スキーに伴う草原の踏みつけの影響を調査して、「植生の破壊地は現在のところ主に雪どけの早いヌマガヤイワイチョウ群落地帯を中心として、雪どけの遅い岩礫斜面のアオノツガザクラカニツリノガリヤス群落の部分にも及びつつある。この点はキャンピングによる被害の大きい鳥海山の鳥の海や河原宿の場合(アオノツガザクラヒゲノガリヤス群落の破壊)とは異なる場所であって、むしろ八幡平頂上付近のケースに類似していると言えよう。」と説明している。

そして、1973年の月山と1971年の鳥海山の植生破壊の調査結果を、踏みつけの強さを植生高と植被率の2要素、すなわち植物側からの間接的に評価した3段階区分によって、それぞれ表4,5のように示した上で、次のように説明した。

〔ヌマガヤイワイチョウ群落の破壊地は海拔1,590mの牛首下、傾斜25°の南斜面にある。表土(泥炭)の厚さは10~20cm程度で処々に岩塊もあり、また裸地化した所では母岩や礫が露出している。〔原文:第19表〕表4から知られるように、踏みつけを受けた植生では極端に植生高が低くなり、また植被率が減少する。踏みつけ下における種個体群の動きをみると、軽度の踏みつけ地では、ヌマガヤ、イワイチョウ、ショウジョウスゲなどの優占種群はそのまま残存するが、大形で組織の軟弱な草本であるニッコウキスゲ、コバイケイソウ、エゾオヤマリンドウやイワカガミ、ミツバオウレン、クロウスゴなどが減少もしくは消滅する。それに対して、群落本来の構成種でないハクサンオオバコ、ヒナザクラが侵入して増加する傾向を示している。強度の踏みつけ地では消滅する種群も多くなって出現種数は自然植生地の11~17に対して約半数近くに減少する。優占種群やチングルマ、シロバナトウチソウなどロゼット型の地上部で木質の地下茎をもつ若干の種類が辛うじて残存している。植被率は30%以下に減少し、表土の露出とともに土壌侵食が大きくなり、残存しているヌマガヤ、ショウジョウスゲの叢生株やイワイチョウの太い地下茎は根上がりを起こし地表面に裸出している。一方、このような悪条件下にあつてハクサンオオバコとヒナザクラは増加し、シラネニンジン、イワショウブも増加の傾向を示している。これらの植物は形態的にはロゼット型ないし部分ロゼット型の地上部をもち、またイワショウブ、イワイチョウのように比較的太くほふく(匍匐)型の地下茎をもっていて不定芽からの再生が可能で踏みつけに対して耐性をもつものである。さらにハクサンオオバコやヒナザクラは種子の発芽がよいので、裸地への侵入定着が早いものと考えられる。しかし踏みつけが持続した場合にはこ

表4 月山牛首下雪田ヌマガヤーイワチョウ群落の種組成の変化
(標高1,590m, 方位 S, 傾斜25° 基質泥炭)

		I					II					III							
		70	71	72	73	91	74	75	76	77	95	96	78	79	80	81	97	98	99
Ssand-number	調査区番号	70	71	72	73	91	74	75	76	77	95	96	78	79	80	81	97	98	99
Herb cover (%)	草本層植被率 (%)	95	100	90	95	96	80	80	80	80	70	80	30	20	30	30	40	20	20
Moss cover (%)	コケ層植被率 (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	5	20	1
Vegetation height (cm)	植生高 (cm)	25	25	25	25	45	15	10	10	9	15	20	5	3	5	7	5	5	2
Number of species	出現種数	14	12	11	11	17	9	10	10	9	10	9	8	8	7	7	10	8	7
<i>Moliniopsis japonica</i>	ヌマガヤ	4	4	4	3	4	3	3	4	4	4	3	2	1	1	2	1	1	1
<i>Fauria crista-galli</i>	イワイチョウ	2	2	2	2	4	3	3	+	1	4	4	1	1	+	2	2	2	+
<i>Carex blepharicarpa</i>	ショウジョウスゲ	1	+	2	2	+	2	2	2	2	2	1	1	+	2	1	2	+	+
<i>Geum pentapetalum</i>	チングルマ	2	+	1	1	2	+	+	1	1	2	4	1	+	+	2	+	+	+
<i>Shortia soldanelloides</i>	イワカガミ	1	1	1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Sanguisorba albiflora</i>	シロバナトウウチソウ	+	+	1	1	+	2	1	2	+	+	+	+	+	+	2	+	+	+
<i>Hemerocallis middendorffii</i> var. <i>esculenta</i>	ニッコウキスゲ	+	1	1	1	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Veratrum stamineum</i>	コバイケイソウ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gentiana triflora</i> var. <i>montana</i>	エゾオヤマリンドウ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Vaccinium ovalifolium</i>	クロウスゴ	2	1	2	2	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Coptis trifolia</i>	ミツバオウレン	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Orchis aristata</i>	ハクサンチドリ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Pedicularis chamissonis</i> var. <i>japonica</i>	ヨツバシオガマ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aletris foliata</i>	ネバリノギラン	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Lastrea quepaertensis</i>	オオバショリマ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Saussurea franchetii</i>	ミヤマキタアザミ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Solidago virga-aurea</i> var. <i>leiocarpa</i>	コガネギタ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Helonipsis orientalis</i>	ショウジョウバカマ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Tilingia ujanensis</i>	シラネニンジン	+	+	+	+	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Plantago hakusanensis</i>	ハクサンオオバコ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	2	2	2	2	+	1	2
<i>Primula nipponica</i>	ヒナザクラ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	+	+	+	2	2	1	+
<i>Tofieldia japonica</i>	イワシヨウブ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Calamagrostis fauriei</i>	カニツリノガリヤス	+	+	+	+	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Peucedanum multivittatum</i>	ハクサンボウフウ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Rhacomitrium anomodontoides</i>	ナガエノスナゴケ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	2	+	+	+	+	+	2	+
<i>Scirpus caespitosus</i>	ミネハリイ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1

I : 自然植生地 II : 軽度の踏みつけ地 III : 強度の踏みつけ地 (石塚ら, 1975 より)

れら残存植物や増加する種群の再生力も抑制されて植被は絶滅し、裸地となってしまうのである。月山においても裸地の面積は次第に拡大しつつある。

同様の傾向はショウジョウスゲーイワイチョウ群落やアオノツガザクラーヒゲノガリヤス群落においても認められる。前者の場合には踏みつけに耐性のあるハクサンオオバコ、ヒナザクラ、ショウジョウスゲ、イワイチョウなどが初めから群落の主要構成種であることから相観や種組成的には大きな変化はない。しかし踏みつけが持続した場合にはショウジョウスゲやイワイチョウ

表5 鳥海山, 鳥の海雪田 アオノツガザクラヒゲノガリヤス群落の
種組成の変化 (標高1,580m, 方位 SE, 傾斜20° 基質岩礫)

Stand number	調査区番号	I			II			III					
		101	105	117	67	66	69	72	64	68	71	76	77
Herb cover (%)	草本層植被率 (%)	60	60	60	40	50	50	50	30	40	20	5	10
Moss cover (%)	コケ層植被率 (%)	10	20	15	0	0	0	15	0	0	0	0	0
Vegetation height (cm)	植生高 (cm)	7	15	20	10	6	5	10	5	5	5	5	5
Number of species	出現種数	15	17	14	5	9	6	8	7	3	3	3	4
<i>Phyllodoce aleutica</i>	アオノツガザクラ	1+11+1	•1••1•	•••••									
<i>Calamagrostis longiseta</i>	ヒゲノガリヤス	223321	2+11•+	3+•••									
<i>Peucedanum multivittatum</i>	ハクサンボウフウ	+111•+	•••••	•••••									
<i>Deschampsia caespitosa</i> var. <i>festucaefolia</i>	ヒロハコメスキ	1••••+	•••••	•••••									
<i>Dicranum falcatum</i>	カマシツボゴケ	+21111	•••••	•••••									
<i>Rhacomitrium sudeticum</i>	ヒメスナゴケ	1++1++	•••••	•••••									
<i>Rhacomitrium heterostichum</i>	クロカワキゴケ	+•••++	•••••	•••••									
<i>Marsipella sphacelata</i>	ムラサキミゾゴケ	+•••++	•••••	•••••									
<i>Carex blepharicarpa</i>	ショウジョウスゲ	122+13	+21122	••11									
<i>Primula nipponica</i>	ヒナザクラ	12+•1+	+•+•+•+	12•+									
<i>Plantago hakusanensis</i>	ハクサンオオバコ	+1+•22	1+3333	1•11									
<i>Tilingia ajanensis</i>	シラネニンジン	++++++	++++••	•••••									
<i>Gentiana nipponica</i>	ミヤマリンドウ	++++•+	•••••	•••••									
<i>Fauria crista-galli</i>	イワイチョウ	1•121•	••1212	•1•+									
<i>Geum pentapetalum</i>	チングルマ	•+•1+•	•2••1•	•••••									
<i>Shortia soldanelloides</i>	イワカガミ	•+2+++	••••1•	•••••									
<i>Coptis trifoliolata</i>	コシジオウレン	+••••+	•••••	•••••									
<i>Arnica unalascensis</i> var. <i>teschonoskyi</i>	ウサギギク	+•+1••	•+••••	•••••									
<i>Pedicularis yezoensis</i>	エゾシオガマ	+•••••	•••••	•••••									
<i>Sanguisorba albiflora</i>	シロバナトウチソウ	++++•+	•+••••	•+•••									
<i>Tofieldia japonica</i>	イワシヨウブ	•+•+••	+••••+	•••••									
<i>Aletris foliata</i>	ネバリノギラン	•+•+••	•••••	•••••									
<i>Pedicularis chamissonis</i> var. <i>japonica</i>	ヨツバシオガマ	•+••••	•••••	•••••									
<i>Tilingia polopetala</i>	イブキゼリ	••••••	+•+••+	•••••									
<i>Juncus kamschatcensis</i>	ミヤマホソコウガイゼキショウ	••••••	•••••+	•••••									

I : 自然植生地 II : 軽度の踏みつけ地 III : 強度の踏みつけ地 (石塚ら, 1975 より)

のような優占種は消滅してゆくの、ヌマガヤイワイチョウ群落と同様ハクサンオオバコとヒナザクラの荒廃地型の群落に置き換わっていくものと考えられる。後者の場合には〔原文：第21表〕表5からも明らかなように群落の主要構成種は踏みつけに対して弱く早期に消滅するので、軽度の踏みつけ地ではショウジョウスゲイワイチョウ群落の種組成をもつ群落に置き換わり、より一層強い踏みつけ地では前2群落と同様ヒナザクラとハクサンオオバコの優占する単調な種組成の荒廃地植生に変化していく。以上のように雪田植生の場合には自然植生の群落型は異なっても、最終的にはヒナザクラとハクサンオオバコの優占するような荒廃地群落に収れんしていく

傾向を示し、群落退行のパターンは湿原植生〔原文：吉岡・橘ほか 1975〕に比して極めて単調なものと言えそうである。

これらの植物に対して踏みつけによる致命的な打撃は、湿原植物と同様、やはり葉や茎の生長点の損傷であろう。融雪直後に一斉に発芽、生長を開始し、短期間に生活環を終わらせなければならぬ雪田植物にとっては、再生を困難にする最も大きな原因である。さらに、土壌侵食の持続による地下部の露出と乾燥、根の物理的損傷もまた重要な原因である。

月山、鳥海山では現在までのところ低地雑草の侵入はあまり顕著ではない。しかし、尾瀬などの湿原の例からみても、裸地の面積が広がれば雑草の侵入が進む可能性は十分にある。登山者たちによって「湿性のお花畑」とよばれてきた雪田草原の、裸地化・礫地化や雑草の侵入といった完全な破壊に導かないためには、夏山スキーの規制を中心とする強力な措置が緊急に必要である。』

雪田植生地帯においての今までの断片的観察、そして越年性残雪に関連して行われた多数の調査によって、従来によく考えられた日本海沿いの山地の積雪が極めて深いことが判明してきた。量的には 10 m を軽く超える深雪地帯の雪が対象になったとき、夏スキーによる破壊現象が発生し、登山路に沿ってそのような深雪が存在した場合に、融雪期に現れた草原がキャンプ好適地として破壊されていたわけである。

したがって、原生的自然の一つとして貴重な雪田植生の保全を図るためには、雪田植生の存在を規定し、雪田植生の群落としてのいろいろな種類の成立に直接関連する積雪についての実態を知る必要がある。

2.3.4 雪田植生と動物

雪田植生地帯でつけ加えられるべき貴重な自然として、植物群落及び残雪などの周辺環境と密接な関係を持つ何種類かの動物がある。

例えば、残雪上やその下に現れる冷い水流に見られるハコネサンショウウオや雪田草原中の小さな湿原の池のクロサンショウウオがあり、アオノツガザクラの多い岩礫型雪田植物群落の岩のすきまをすみかにするイタチ属のホンドオコジョの活動も見られる。

そして、典型的雪田草原を構成するヌマガヤを優占種とする植物群落上には、夏の限られた 2～3 週間間に、高山チョウの一種ベニヒカゲが乱舞する。ヌマガヤ群落の中には、ベニヒカゲの食草として知られるオニノガリヤス（イネ科）、タテヤマスゲ（カヤツリグサ科）などが混生していることが多い。ベニヒカゲは人によって準高山チョウに区分する例もあるが、隔離分布によって山ごとに亜種が形成されるとも言われる。亜種の形成に関連しては、日本の自然の水河時代からの推移を究明する材料でもあり、小暮（1981）は大陸からの 2 ルート移住説を出し、北回りが北海道に、南回りは日本海沿いに北上し、その北限が鳥海山であるとの仮説を提案している。

鳥海山と月山の昆虫類を調査した白畑・黒沢（1972, 1975）は、冬の季節風に基づく大量の積

雪に由来する夏季の残雪が、日本海沿いの鳥海山、朝日岳、飯豊山及び月山にベニヒカゲの住みかになりやすい偽高山帯の形成をもたらしたことで、内陸に位置する蔵王山地にベニヒカゲを見ない理由を検討している。蔵王山地には食草を含む雪田草原の貧弱なことが考えられる。

なお、両氏の調査報告には、湿原を含む雪田植物群落として規模の大きい、月山の弥陀ヶ原は、月山のベニヒカゲ分布地帯の中で最も多産する地域であったが、近くまで自動車道路が開通して以来、次第に個体数が減少しつつあると表現されている（白畑・黒沢，1975）。雪田植生地帯の乾燥化その他が考えられるが、明白な因果関係は不明である。しかし、この地帯からベニヒカゲの食草が減少又は消滅すれば、ベニヒカゲの衰退は十分予想される。

食草は雪田の植物群落として、やや乾燥しやすいヌマガヤ群落に含まれることが多く、この群落は踏みつけなどの人為破壊に弱いものである。

第3章 多雪山地積雪深の算定とリモートセンシング

今までに述べたように、雪田植生に関連する積雪の深さは、5~10 m程度をかなり超える場合の多いことが推測できた後も、直接的測定 of 技術上の限界が実質的に5 mであったため、前章で説明したような多雪山地の最深積雪についての実態は、ほんのわずかしかなかった。

従来は、それほど顕著ではなかった多雪山地の雪田植生の破壊が、第1章にも述べたように大量輸送手段の多雪山地への侵入に伴い、かなりの程度で進行しつつあるか、あるいは予想される事態が多くなっていると言える。したがって、保全対策のため、精度を若干低めても、広い地域について、面的な積雪深情報を短時間のうちに入手できることの可能性を検討することが重要である。

ここでは、既に開発済みの空中写真測量による測定手法の説明と、それよりは精度は低められるものの、今後の開発が期待される衛星リモートセンシングについての可能性を検討する。さらに、衛星リモートセンシング開発に際して重要な役割を果たすグラントルース (ground truth) について言及する。

3.1 空中写真測量

3.1.1 積雪深算定の原理

空中写真測量 airborne photogrammetric survey による積雪深算定の原理は、空中写真測量によって地形図を作成する方法を応用したものである。空中写真測量は、同高度で水平位置が少しずれている (高度との関係で決まる) 2枚の写真を使って両眼でそれぞれを見た場合に、地物の高低が視覚に示される立体視の原理を利用している。立体視の原理に基づく、空中三角測量が、現在の中~大縮尺地図作成の基本になっており、国土地理院地図として代表的な2万5千分の1地形図については、厳密な作業規程が用意されている (建設省国土地理院, 1978)。空中写真測量の結果をいれて、機械図化によって地形図が作られるのが普通である。このような地形図を2枚、1枚は降雪季節直前のものを、他の1枚は降雪季節終わり頃について作成すれば、2枚の地形図の等高線の差が積雪深になる。したがって、2回の空中写真測量用の撮影によって、ほぼ最深積雪の深さが等高線の形で得られる。

地形図作成に用いていた平板測量は、1950年代以後次第に前述の空中写真測量に置き換えられ、また無雪期と有雪期の2回の写真測量によって積雪深を算定する技法も続いて開発されたが、その成果である積雪深分布図の公表されている例は思いのほか少ない。少ないいくつかの報告 (小笠原・藤平, 1966; 高崎・五百沢, 1964; 土屋, 1976b) によると、算定の精度は条件の良い場合

ほぼ±50 cmである。これは次のような事情に基づくものである。

雪のない場合の、空中写真測量による地形図等高線の誤差はほぼ20 cmで、技術的には完成の域に達しているとも言われている。しかし、森林、露岩等の地表構成物質の形状によっては、この精度は低下するし、深い谷など急斜面その他の複雑な地形にあっても、やはり精度は低下する。

積雪季節終わり頃の撮影では、表面がなだらかになる分だけ、精度は向上するはずであるが、同時に積雪が新しいと、いわゆるハレーション現象によって、高低起伏の区別ができなくなり、図化不能になる場合もある。したがって、比較的なだらかな地形の山地で、積雪の風化が進んだものについては、かなり高い精度の等高線図が作成可能になる。そして、2組の等高線の差を使うと、1万～1.5万分の1の写真を使用した1万分の1縮尺の地形図で、ほぼ±50 cm程度の精度で積雪深分布図の作成が可能になる。

3.1.2 積雪深分布図の作成

1973/74年の冬は東北地方に観測史上最大級の大雪をもたらしたが(仙台管区气象台, 1974), 筆者が分担した調査において、1974年4月6日に鳥海山・月山・飯豊山のそれぞれの山地で最も積雪量の多い地帯を対象にして、測量用の空中写真撮影を実施した。この撮影は精度の高い積雪深分布図を作成するため、前述した精度向上の諸条件をできるだけ満足することを目指して、ほぼ1か月以上の待機の後、最良の機会があって実施できたものである。(土屋, 1976b)。

図7は月山の山頂から南東斜面にかけての積雪季節直前の状態であるが、この場合、1973年の撮影写真がなく、1963年のものである。したがって、越年性の残雪(図では雪という表示がしてある)のある部分では、年による違いが誤差として加わる。この図は国土地理院の2万5千分の1地形図の原図を作成する方式で、1万分の1縮尺の原図に作成したものである。

図8は、1974年4月6日における積雪面を地形図の等高線表示の形式で示したものである。範囲は図7と同じであり、積雪面上に露出している建造物(神社、山小屋、リフト鉄塔など)と大岩石を対空標識として使用しているが、いずれも図7の上で位置と高度が明示できるものが選ばれている。

図9は、図8の等高線高度と図7の等高線高度との差、すなわち積雪深(単位:m)の等値線によって示したものである。ここでは吹きだまり型の残雪の表示に重点を置いたので、りょう線とその風下斜面(冬の北西の季節風に対して)に限定した。前に示した図1(p.20)の月山雪田植生模式図に対応するのは、この図9に示された特に積雪の深い部分であって、パッチ状に分布する、ほぼ20 m以上の深雪地帯に相当する。このような深雪地帯の数は図2と図9の例からも理解されるように、一つの山地でかなりの数になるが、この種の積雪深度分布図によって区分でき、第5章(p.90)に述べるように、そのすべてが雪田植生の分布域である。また個々の雪田植生の無植物地帯または極めて雪田植生の貧弱な地帯を示す資料として使うことも可能と考えられる。

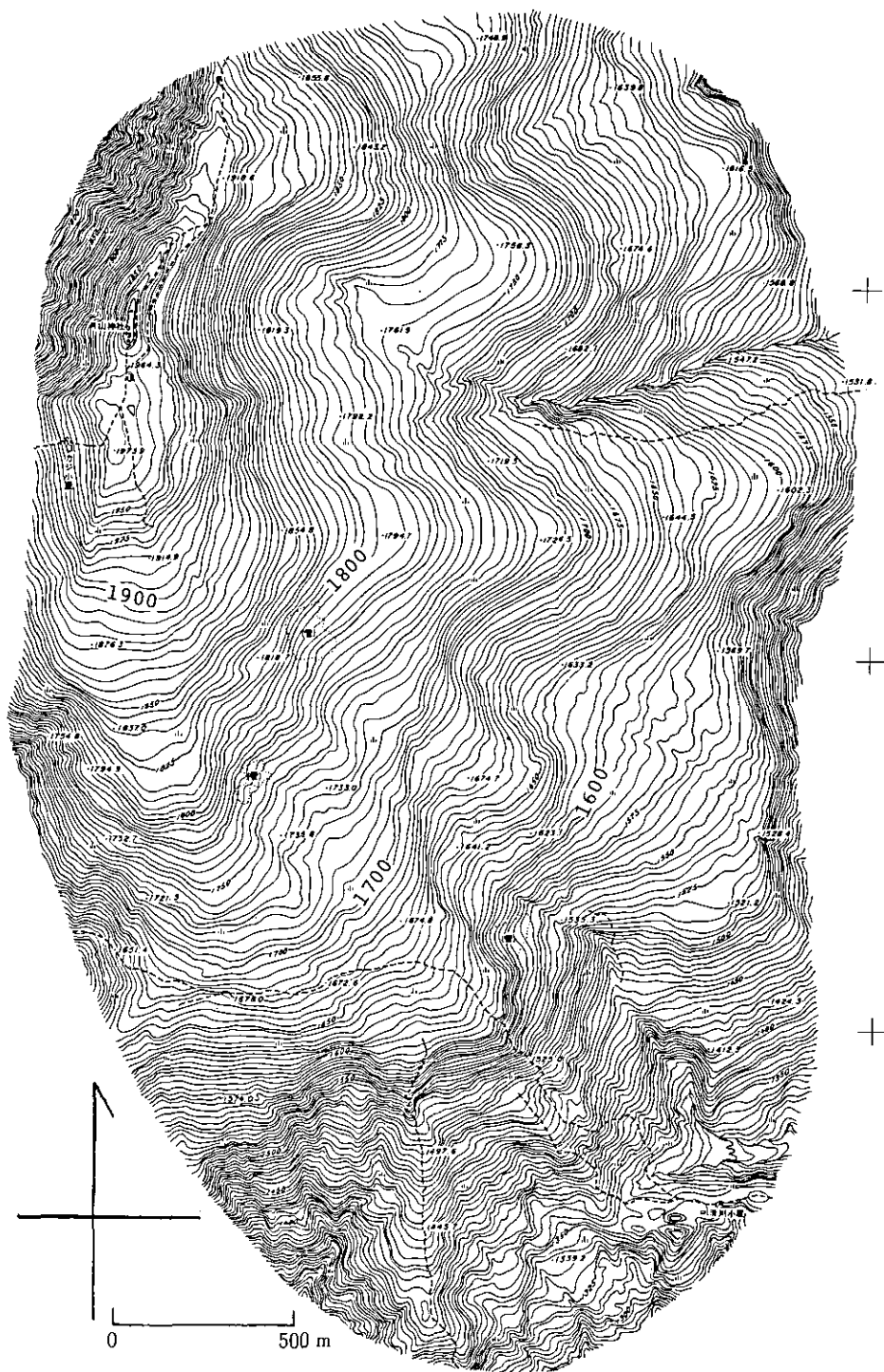


図7 月山の地形図

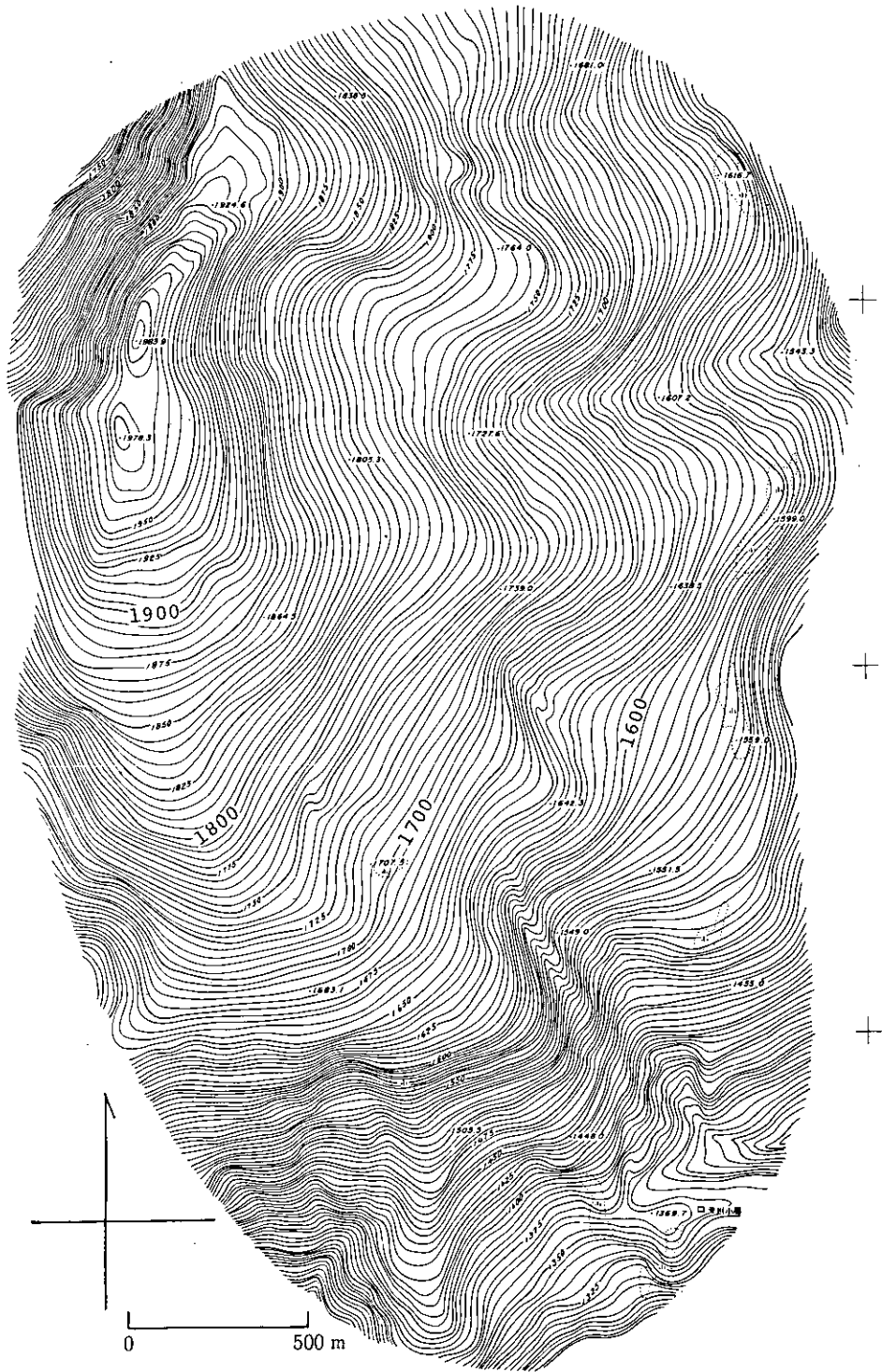


図8 月山の積雪地形図 (1974年4月6日)

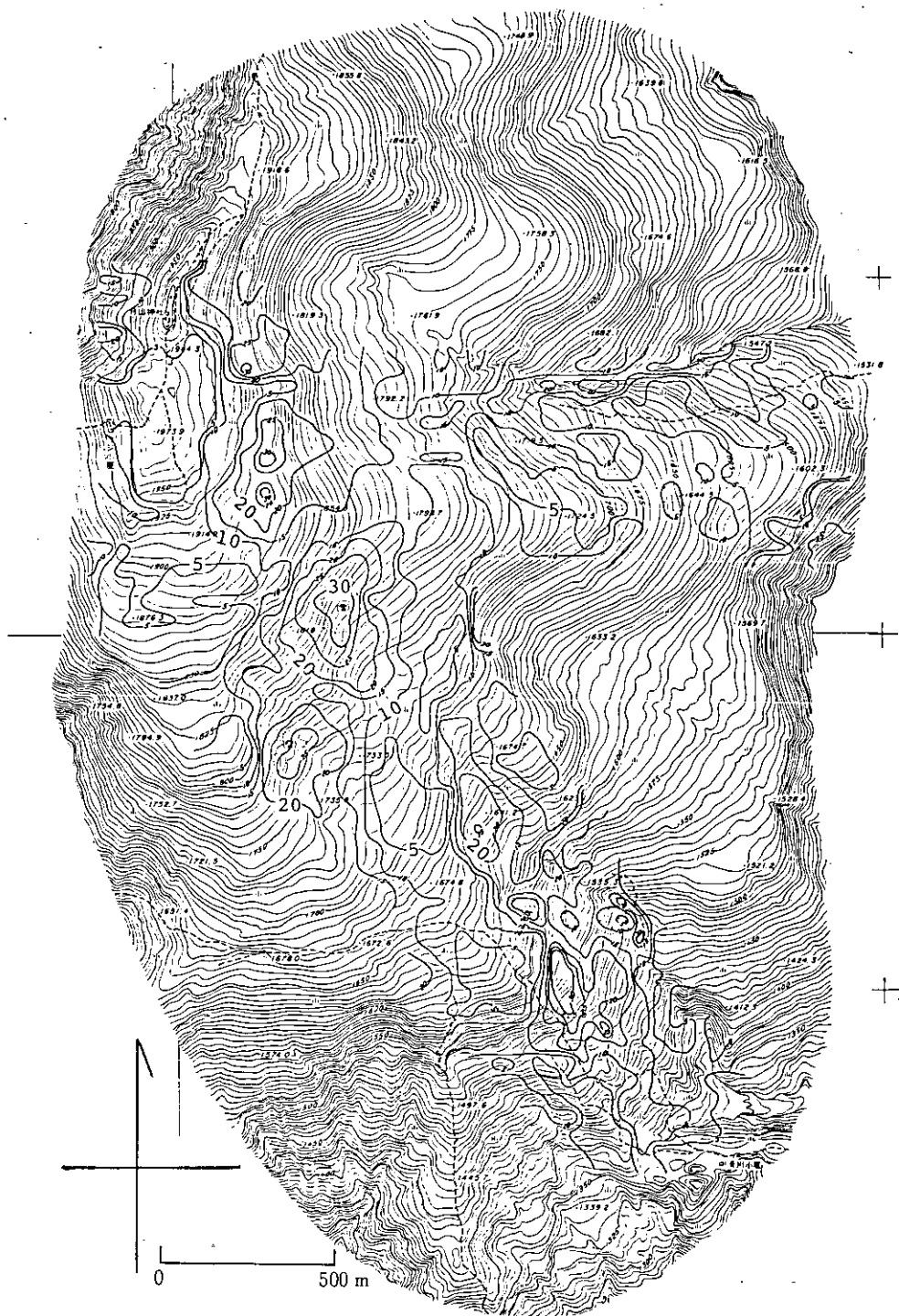


図9 月山の積雪深(m) (1974年4月6日) (土屋, 1976bより)

3.1.3 積雪深分布図の役割

図2と図9は、いずれも1973/74年の大雪を反映したものであって、平年的な最深積雪を示したのではない。しかし、10数年分の空中写真測量規格の鉛直写真やその他の現地調査に関連した資料等によって、吹きだまり型の残雪の位置はほとんど毎年同じであり、深さと面積が年々変動することが判明している(土屋, 1977b)。したがって、たとえ1年だけの積雪深分布図であっても、吹きだまり型残雪の厚いものの位置と規模については、有効な情報として使えることになる。

積雪深分布図は、前述した空中写真測量規格以外に、空中写真を用いる方法はいくつかあるもので、それらによって求めることができる。例えば、あらかじめ高さ等の判明しているものの雪による埋まり具合とか、あらかじめ設置した雪尺等を含めて撮影された写真とか、地表を構成する森林等の雪による埋まり方を写真の濃度によって表現した関係式で求めておいたものを利用するとさまざまな方法がある。しかし、広い面積、人の入りにくい場所を多く含むような場合には、定性的な判読解析が主観的になる部分が増えて精度は低下し、また10mを越すような深雪ではほとんど使えなくなる。

空中写真測量による積雪深分布図の作成では、前にも述べたように高い精度を維持するための、天候や雪質についての条件がかなり限定されている。したがって、作成できる機会はわずかであるが、作成されたものの利用価値は極めて大きい。主なものを示すと、

- 1) 水資源としての積雪水量の推定
- 2) なだれ等の雪害地帯の判別
- 3) 山岳道路適地の判別
- 4) 山地自然植生の生育条件の調査
(前出の雪田植生地帯の検出と調査など)
- 5) 造林適地の選定
- 6) 観光開発(スキー場適地の判別など)
- 7) レクリエーション(冬山登山の必要情報として)

など種々考えられる。

結局、1枚の積雪深分布図が読む人の目的によって、自然保全のためにも、またそれと競合する人為的自然破壊のためにも、また相反する両者の調整のための資料にもなる。

このように利用価値の高い積雪深分布図であっても、作成するための機会を得ることは困難であり、同じ地域で毎年というようなことになると、経費の面でも極めて困難になる。そのため、次第に定常的提供方式になってきた衛星データを利用することが提案されて、衛星水文学(satellite hydrology)という分野も確立されつつあるのが現状である(例えば、Deutschら, 1981)。

そして、空中写真測量による積雪深の算定は、衛星リモートセンシングによる算定に対するグラントルースデータとしての役割が今後に期待されるので、機会があれば実施すべき技法であるとする。

3.2 衛星リモートセンシング

3.2.1 積雪探査の原理

積雪の反射率は、積雪表面が時の経過によって、汚れたりしない限り、可視波長周辺の波長帯に対して極めて高い。したがって、太陽放射の可視波長帯の一部から近赤外波長帯における、地表からの反射信号を利用するランドサット (Landsat) の MSS (Multi Spectral Scanner) の 4 波長帯に対して、設定された入力信号の強度レベル範囲の最高値付近又はそれを超えることが多い。ランドサット MSS の 4 波長帯は、 $0.5\sim 0.6$ 、 $0.6\sim 0.7$ 、 $0.7\sim 0.8$ 、 $0.8\sim 1.1\mu\text{m}$ であって、それぞれにバンド番号 4、5、6、7 が割り当てられている。そして、衛星データの利用者が通常使用する CCT には、それぞれのバンドに対して $0\sim 127$ の範囲で反射信号が数値化されて入っているが、出力すると最高値の 127 付近に集中してしまう。衛星写真に表現すると反射輝度が高いことになる。

この特色は、厚い雲に対して得られた場合と同様であるが、地表を構成するその他の物質に比べて、バンド 5 の付近で図 10 に示すように、格段に高い CCT 数値となって出力されるので、雲のない場合の地上の積雪を検出するのは比較的容易である。この場合、MSS の 4 波長帯を組み合わせる必要はなく、バンド 5 を用いるだけで良い。水域が極端に低い CCT 数値になることが多い (懸濁物質の多い汚染水域等は別であるが) ので、河川、湖沼及び海岸等を含んだ地域については、地理的位置の精度も比較的良い。

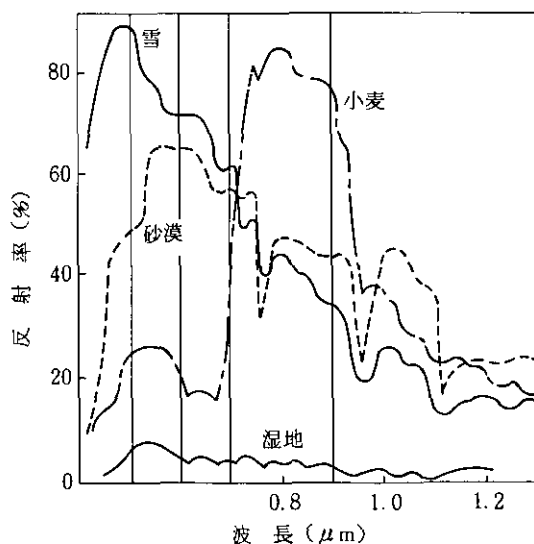


図10 物質ごとの分光特性
(キャノンイメージ編集室, 1974 より)

バンド5の波長帯0.6~0.7 μm は、可視波長のだいたい色を中心にした部分であるため、通常の光学系カメラにおけるだいたい色のフィルターを付けたものに近くなる。このため、遠方の地物のコントラストが良いので、バンド5だけの出力画像は超高空からの地形強調写真として使うこともできる。山地の限られた部分に散在する残雪を検出するためにも有効な特色である。しかし、新積雪が図11に示すように時間的推移とともに、その反射率を積雪の変態に対応して変化することも考慮する必要がある。積雪の質によるランドサット4波長帯の反射率の違いを図12に示したが、この現象を使って、積雪の質に関連した情報を検出して解析することもできる。

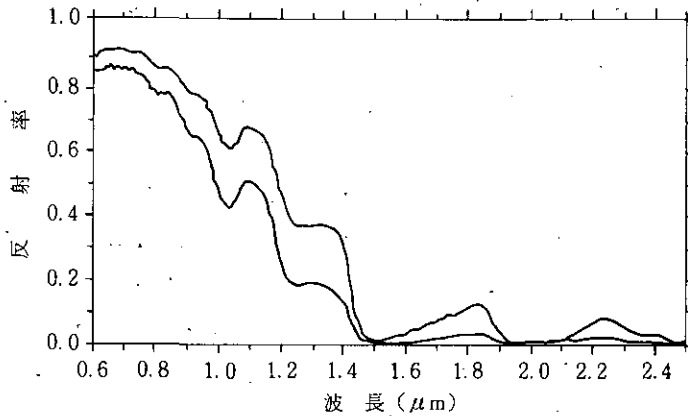
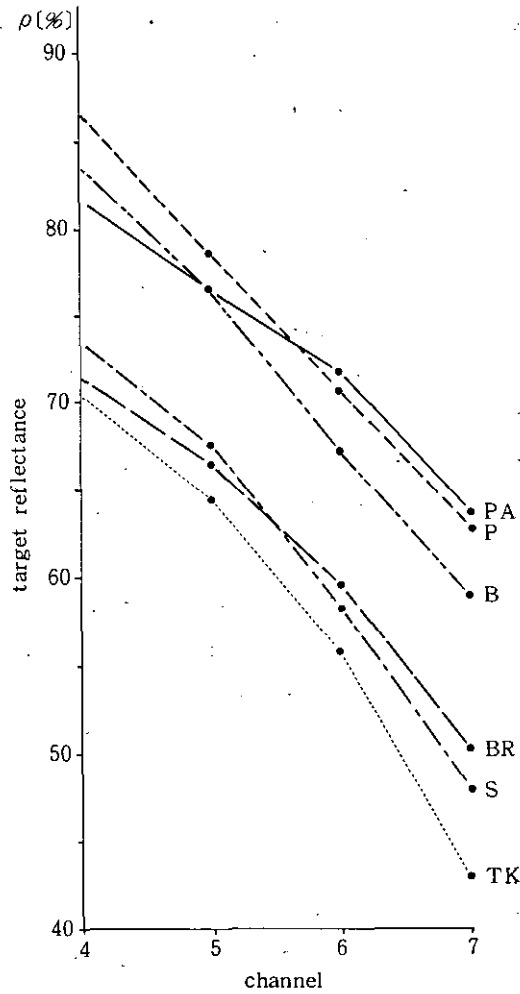


図11 積雪の時間経過に伴う反射率(BaSO_4 との比)の変化
(上:新雪;下:2日後の古い雪)
(O'Brien & Munis, 1973に基づく Haefner, 1980より)

したがって、地上での解像度80m(宇宙開発事業団提供のCCTでは、幾何的(geometric)補正のためのデータ再配列によって、出力データとしては57mになったものが含まれている。)に対応した精度の積雪分布図を作成することができる。もし、何日間かの間隔で、同じ衛星によって、同様の原理に基づく積雪分布図が得られれば、2枚の積雪分布図の比較によって、増減した積雪の面積が算出できる。残雪の季節であれば消失面積に、消雪深その他の量を入れて、流出解析その他の作業が可能になる。

積雪の面積については、上述のように、雲さえなければ、積雪の高い反射率に近いものが他にほとんどないことを利用して、比較的容易に解析できるが、積雪深についてはかなり困難であった。従前から、1波長帯を使用したいいくつかの気象衛星による解析技法の開発があった。積雪があまり厚くない場合、地面や植生を完全に覆うことがないため、反射率が低下するという現象を利用したものである。しかし、降雪季の積雪では、それほど深くない積雪の段階で、反射率に対応した輝度レベルの上限になってしまう。このため、表現できる積雪深の限界は15~50cmであるといわれてきた(例えば、Barnes & Bowley, 1968; McGinnis *et al.*, 1975)。



Legend PA= powdery snow BR = brittle snow
 P = sticky snow S = spring snow
 B = slush snow TK= solid crust

図12 ランドサット4 波長帯別の種々の積雪に対する反射率 ρ (%)
 (Steanz, 1976 に基づく Haefner, 1980 より)

このため従来の衛星データの積雪調査への利用は、主として積雪面積を利用するものであった。それでも、Aul と Ffolliott (1975) の例のように流出解折ではかなりの成果があげられた。彼等はランドサット1号によってアリゾナ山地のある集水域の積雪面積を算出し、集水域内のスノーサーベイデータとの関係を吟味して、融雪流出高と算出積雪面積との間の回帰式を作成し、決定係数 r^2 が0.995という精度の高い推定のできることを示している。しかし、これは永年にわたって信頼度の高いスノーサーベイデータの蓄積のあった場合であり、日本のようにスノーサーベイ

が不可能になるほどの深雪地域では、解決すべき問題点がかなり多い。日本の場合、何らかの手段で極端に深い（例えば5 m 以上）積雪についての情報を得ることが、積雪探査とその利用に際して必要になるはずである。そして深雪を対象にした研究は、外国では例がなく、日本でも始まったばかりである。

確かに、反射率によって直接の積雪深表示をすることには50 cm 程度という限界があるが、降雪季節が終わって、積雪が融解し、積雪の面積と深さが減少していく残雪の季節については、積雪の融解過程等の特色を利用した間接的算定を重ねる方法を考えることも良いはずである。

この研究で対象にした積雪の深さは5~10 m 以上のものであり、1 波長帯での反射率のみを用いて降雪の季節に適用しても役に立たない。しかし、降雪季節を過ぎて残雪の季節にはいれば事情は変わってくる。図12に示したように、降りたての新雪は山地では粉雪の形で推積し、反射率が高く（図のPA）、春の湿った積雪（図のS）や固結した残雪（図のTKに近い）では反射率が低下し、近赤外域のバンド6と7でさらに低下し、特に7では顕著になる。

したがって、バンド4と5あるいは6の高い反射率によって積雪領域を検出し、積雪の質による反射率の違いが広い分布幅を示しているバンド7によって積雪の質の違いを示すことが可能である。もし、積雪の質の違いが積雪深の指標となり得るような因果関係が判明すれば、積雪深に関する新しい解析手法が可能である。粉雪の反射率が高いのは、密度が低いためである。密度が低いことは空気を多く含み、気泡を多数含んだのと同じになり、80%以上、時にはしばしば90%を越す反射率となるからである。他方、湿った雪では水の反射率（10%以下）に少しずつ近づき、固結した残雪は密度が高く、水の反射率に近づく。水の反射率も水に次いで低い。

一般に、春に近くなると、古い積雪の温度は0°C付近を上下するような気温環境のもとに置かれ、融解再凍結等の変態過程によって氷に近づくが、その過程で空気を外に押し出し、密度が増加する。また、春から夏にかけては、水と共存するぬれ雪状態が多く発生し、この場合も密度が増加し、反射率は低下する。ところが、春になってもなお10 m を超す状態の積雪では、同じ古い積雪であっても、真冬の低温、すなわち降雪時の低温状態が、薄い積雪よりも保存されやすく、表面も低温であることが、残雪の調査によって認められている（土屋、1978 b）。他方5~10 m の厚さの積雪では保存期間も短くなり、5m以下では残雪の季節にはいると間もなく全層が0°Cになり、水と共存することが、いくつかの観測例（例えば、中川ら、1976）によって推定できる。したがって、薄い残雪は0°Cのぬれ雪状態で反射率が低下するが、厚い残雪では0°C以下で水分が少なく乾いた状態であって反射率低下の程度は少ないと考えられる。

残雪の厚さと反射率については、さらに別の要因が関係する。それは降雪季節の積雪について認められていたのと同じであるが、残雪が薄いと地表の植生等を完全に覆いきれないため、残雪領域全体の反射率が低下する。この関係は植生の種類や地表構成要素によっても変わるが、残雪が薄ければ反射率は低下し、厚ければ高くなる傾向は変わらない。

いずれの関係でも、残雪の厚さは反射率の増加に結びついているので、実際のランドサットデー

タで確かめた例を図 13 に示す。1979 年 5 月 22 日における、鳥海山の山頂付近を通るバンド 5 の走査ラインの各ピクセル（画素）ごとの反射輝度に相当する CCT 数値を示したものである。

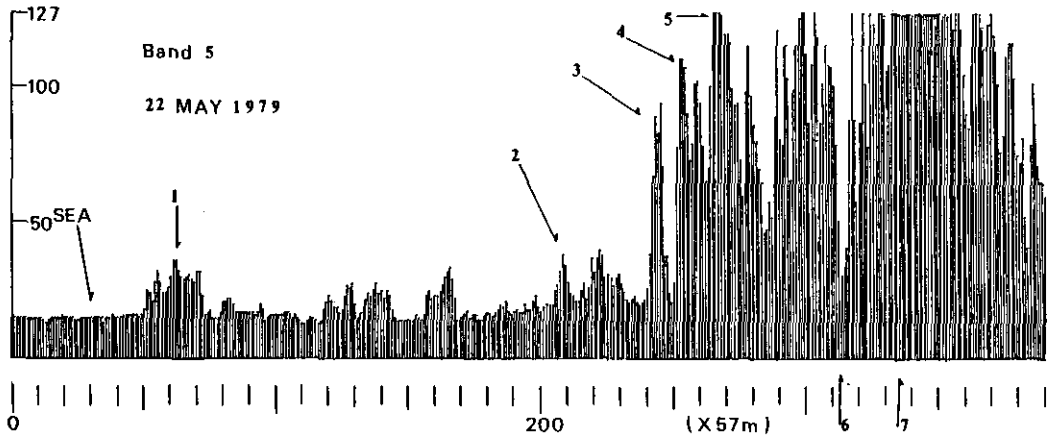


図 13 山頂を通るランドサットのバンド 5 走査線上の CCT 数値
 (地点 1：国鉄羽越線付近象潟町小砂川の南，2：鳥海ブルーライン付近，高度 1,060 m，3：残雪が1/2以下程度の面積率で出現する場所，高度1,500 m北斜面，4：残雪が少し厚くなる場所，高度1,560 m，5：残雪がかなり厚くなる場所(鳥海湖の北側)，高度1,640 m北斜面，6：山頂新山付近で残雪の無い場所，高度2,230 m，7：残雪が極めて厚い場所，高度 1,900 m 東斜面) (土屋，1981 より)

海面での値が最も低いが，陸上では地表の構成物質によって異なり，残雪の見られるあたりから急に数値が上昇する。しかし，残雪以外の地表，例えば，植生あるいは岩石の露出等のある場合は，残雪の十分厚い所よりかなり低下することがわかる。

さらに，バンド 4，5，6，7 のそれぞれについて，同じ場所の CCT 数値を表 6 に示した。地点番号 3，4，5 と残雪が増加するにつれ，いずれの波長帯でも数値は増加している。これらの数値はバンドごとに別々の単位スケールで分割されている。そのため，一種の相対的数値になっており，センサー系統に含まれる何らかの誤差要因もはいるので，厳密なグランドトゥースとの対応関係をこのままで吟味することはできない。しかし，地点ごとの合計値は，残雪深度の一種の指標になり得ることを，検討してみることが一つの実用的処理方法であると言える。

ここでは，3～7 の各地点ごとの残雪についての既知の値(写真測量その他の手法による算定値)に基づいて，後述(p.46)のように深度を指標化して階級区分することを試みた。この種の区分では，残雪領域の面的な広がりや形とか，残雪の中の極端に深い部分が，実用上有効な程度に表示できるか否かに重点があり，個々の数値間のわずかな食い違いは無視することも考慮する必要がある。

表6 山頂を通る走査線(ライン)上の地点別波長帯別 CCT 数値 (1979年5月22日)

地点番号 (図13と同じ)	ピクセル番号 (添付地図左端水域 記号を1とする)	ランドサットバンド番号				D 合計値
		4	5	6	7	
Sea	30	19	15	11	4	49
1	61	28	36	46	32	142
2	208	32	38	47	36	153
3	243	75	89	109	79	352
4	252	89	110	116	72	387
5	265	102	127	127	95	451
6	313	30	31	37	31	129
7	333	125	127	126	105	483

(土屋, 1981より)

今まで述べた解析上の原理の中には積雪面積のようにほぼ確立しているものも、積雪深のように可能性の段階で証明の不完全なものもあるが、それらがすべて成立しているものと仮定して、いくつかの解析モデルを作成した。

3.2.2 積雪モデルの開発

(1) 面積

積雪の境界部分の CCT 数値 A を定めて、解析領域の全画素に対して、 $x \geq A$ を満足する x の画素数 n を数え、単位画素の面積 s を乗じて得られる $S = ns$ が積雪の面積になる。方法は簡単であるが、 A の設定値は目的によって変化する。また、解析対象地域の地表特性や季節によっても変化する。

例えば、新積雪あるいは比較的新しい積雪に対して、無雪地域と積雪に覆われた部分の CCT 数値の両者の平均を用いれば、積雪境界部分にほぼ一致するという考え方を採用している例がある(武田, 1983)。他方、残雪のように、かなり時間を経過した積雪については、平均よりかなり高めの数値を設定している例もある(土屋, 1981)。残雪現象では、しばしばその境界部分から残雪中央部にかけて急に深くなるという現象が、大規模かつ多数の残雪群が散在する、多雪山地ではよく認められているからである。残雪の質量算定あるいは、雪田植生地帯の検出という場合に、面積の過大評価を避けるほうが結果的に良いという経験に基づいている。

実際の解析では、ランドサット MSS のバンド 5 について、0~127 の範囲のうち、80~100 の値を与えて、現地調査や航空写真等によるグランドトゥースデータを用いた試行錯誤的修正方法が実用的である。

なお、今後積雪調査のために利用が予想されるものに、熱赤外波長帯 (10 μ m 前後) を用いて、温暖な季節に 0 $^{\circ}$ C を表示する部分の画素数を計算する方法がある。ランドサット 4 号のように解

像度の良いもの(約 120 m)が、現実には利用できない事情にあたるためこの章では省略したが後述の事例解析の NOAA の利用において説明する。

(2) 融雪

季節の進行に合わせた 2 回以上の残雪面積が得られると、それらに基づいて面積減少についての融雪モデルが作成できる。もし、融雪によって消失する面積が、そのときの残雪面積に比例すると仮定できれば、比例係数すなわち消失係数 k を求めるためには、

$$\frac{dS}{dt} = -kS \quad (1)$$

を解けば良い。ここで、 S は残雪面積 (km^2)、 t は日単位の時間数である。

1979 年 5 月 4 日と 22 日のランドサットデータを使った例では、4 日の面積が 61.1 km^2 、22 日の面積が 38.4 km^2 になるので、前者を S_0 とし、18 日後の後者を S_{18} とした境界条件で、前述の式(1)を解くと、 k は 0.0258 になり、

$$S = 61.1 e^{-0.0258t} \quad (2)$$

が得られる(土屋, 1981)。

このモデルが適合する範囲については、季節、山岳による違い、残雪の型など、さまざまな適用可能性についての問題がある。これらについては、現地の実態を示すグランドトールスによる検証によって検討できる。

このモデルの利用分野としては、雪田植生の水文学的環境の表現のほかに、水資源に関連した流出モデルの作成がある。流出モデルでは、日融雪高又は月融雪高が算定できると、面積消失量に乘じることになる。もし、その流出モデルが実際の流出解析と良く一致していれば、前述の融雪モデルがほぼ正しいことになる。

鳥海山南斜面の小さな洪水制御専用ダムである、月光川ダムの流量解析では、初夏の夕刻に残雪融解に基づく流量極大を示す日周現象とともに、融雪モデルがほぼ正しいことが認められた(土屋, 1983)。

(3) 残雪深度

前述の波長帯別の反射率が積雪の質によって違い、質の違いが積雪(この場合は残雪)の深さを反映することを利用して、図 14 のような特徴空間を考えることができる。この特徴空間では多次元レベルスライスと表現されるクラス分類が適用できるが、1979 年 5 月 22 日の場合、表 6 に示したような地点別波長帯別 CCT 数値が得られた。深度解析の目標は厚い残雪である。したがって、残雪境界は厚い部分に置くほうが良い。そのために、解析領域内 (512×512 画素) のバンド

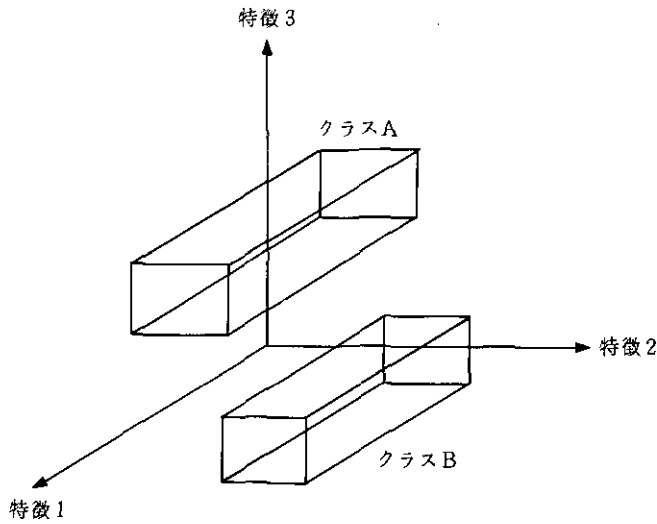


図14 多次元レベルスライス法の概念
(宇宙開発事業団地球観測センター, 1982より)

4, 5, 6 のヒストグラムを検討すると、数値上限の 127 が極端に多い。他方、残雪が薄かったりまだらに存在するために低下する境界地帯の数値に相当する、80~100 の量が少ないことが利用できる。また、バンド 4, 5, 6 (x_4, x_5, x_6) の数値が低くて(ただし 80 以上であって)、バンド 7 (x_7) の数値が高いことは残雪地帯ではあり得ないので、 $x_4 \sim x_7$ のすべての合計値の大きいものは厚い残雪であると見なせる。そしてその逆も成立する。この特色を利用すれば、例えば、 x_5 によって積雪境界を示し、 x_7 によって積雪の質(ここでは深度)を表現するために、多次元スライスを用いるべきところを、残雪については実質的に x_7 のみによる 1 次元スライスに置きかえることができる。そこで、単純な加算式として次のように(3)式を考えた(土屋, 1981)。

$$D = x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \quad (3)$$

そして、非常に厚い残雪に対して、指標化された D の値を 476~485 と 486 以上の 2 階級に区分した。なお、定点写真その他によって得られた残雪境界地帯の D の値を概数として求めたのが 370~380 であったので、375 以下を無雪地帯とし、376~475 を 10 等分した。これによって D の値の 13 階級が設定されたので、階級別分布図として出力したものと実際の残雪分布との照会をした。照会結果は良好であったが、それについては、次の第 4 章の解析事例で詳述する。

ここに示した、1 次元スライスは、 $x_4 \sim x_6$ の合計値を上限が 381 のある範囲内に収まる(スケールアウトしているため)定数項として、 x_7 のみを変数項にした上で、厚い残雪の検出に重点を置くという見方に近い。したがって、物理モデルを考慮したが、十分吟味の上で作成した式ではないため、テストサイトの観測等によって改善の必要なものである。

この方法では、バンド4～6の合計値の定数項にバンド7の変数項を加えて、残雪の深度表示にするとともに水域をバンド7のみの変数項で示すことができるため、図14のクラスAに残雪を、クラスBに水域を当てはめたものの変形と見なすこともできる。

なお、(3)式の有効性を検証するためには、地図上に良い精度でオーバーレイできる必要がある。ここでは、水域に対して非常に低い数値を示すバンド7の特色を用いた。すなわち、山地周辺の湖沼群を検出して、5万分1仕様で出力した残雪深度階級区分図に加えておくことで、GCP (ground control point) を用いて精密補正したもの(1ピクセル前後以内の誤差)と同等以上の精度にすることができた。具体的作業としては、山頂を中心にして山麓の湖沼3か所以上を地形図上でランドサット検出湖沼領域と目視で重ね合わせるといった簡単なものである。これは狭い領域内でのGCP設置と同等の意味を持つために、精度が高められる技術である。付図として巻末に添付した図24は、地形図との2枚組にしたものが版下になっている。

3.3 テストサイトの選定とグランドトゥース調査

3.3.1 テストサイトの必要性

リモートセンシング技術を利用する場合、測定用センサーは、測定対象物からかなり離れているのが普通である。このために、対象物から反射又は放射された電磁波が、センサーによって記録された後に、その記録からもとになった電磁波の実態を判定するための手段が必要になる。センサーと対象物との間に、空気その他記録数値を変化させる要因が含まれているからである。変化量を理論的に求める方法も開発されているが、実用的な手段として、変化の前後の測定値によって変化量を求める方法、あるいは両者を併用する方法が考えられている。

変化の例として、例えば、物体からの熱赤外放射を探索する放射温度計を用いて水面を測定すると、高空の気温が地上からの高度に応じて低くなる場合、放射温度計の置かれた高さによって、変化量は0°Cから10°Cぐらいにまで変わることがある。つまり高度300mで25°Cの記録上の測定値が得られたとき、真の値が35°Cであるという場合、10°Cに相当する記録の変化量を知っていないと、誤った理解をすることになる。

変化量の10°Cは、高空のセンサーで得られた25°C、すなわちリモートセンシングデータと、水面を直接測定して得た35°Cの記録、すなわちグランドトゥースデータ (ground truth data) によって得られる。そして、もし変化量として10°Cが300mの鉛直空間距離で、ほぼ成立することがわかれば、他の水域でのリモートセンシングデータのみを用いて、水面温度を算定することができる。

変化量に関連する面的な問題として、一様でない地表特性に由来する例を示す。図15は都市とその近郊を模式化したものを示したが、Aはセンサーの面解像度が十分に高く、地表からの電磁波の真の値(大気補正量をゼロとみなして)が記録されたものである。BとCは解像度が低く、周辺の値と平均化してしまうことと、センサー直下点が少しずれるだけで記録数値が変化するこ

とを示している。ここに示した数値は、熱赤外波長帯を用いた温度(°C)を想定しているが、他の波長帯についても事情は同じである。

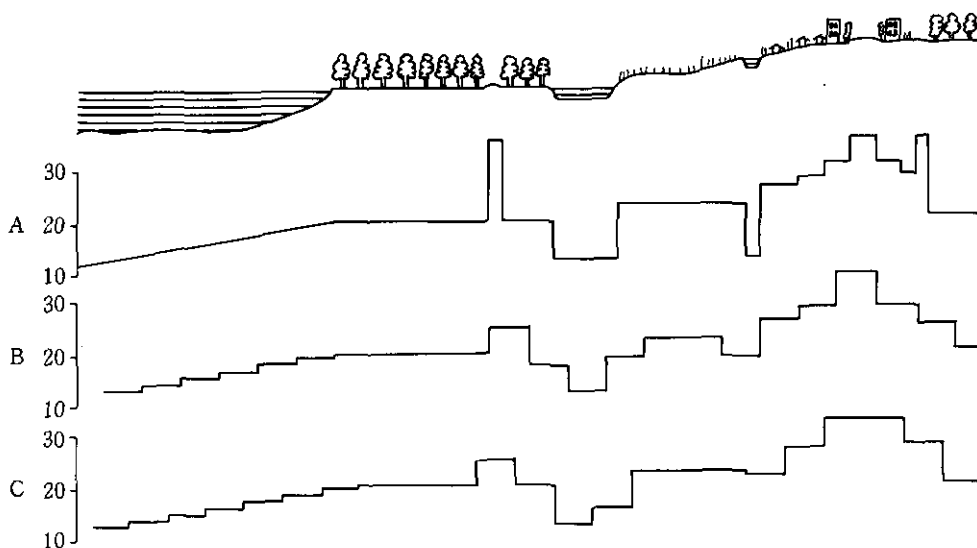


図15 リモートセンシングデータの変形
(A：真の数値，B：解像度が低いときの数値，C：センサー位置がずれた場合)

前述の水面の測定値の変化量 10°C 、あるいはこの図に示されたような変化現象について、実験室に相当する繰り返し測定等によって、地表の実測値と高空からのリモートセンシングデータとの関係を調べる地域が、テストサイト(test site)である。リモートセンシング技術の特色である、広域同時性を活かすためには、グランドトルースデータを広範囲な地域から求めるよりも、特定の現象や物体の典型が集中して存在しているような地域を、テストサイトに選択して、グランドトルース観測をするほうが効果的である。

リモートセンシング技術が1960年代に定着し、拡充を続けている米国には登録されているテストサイトが多数あり、自然環境の問題の調査に重点を置いたものに、Arizona Regional Ecological Test Site, Rocky Mountains Environmental Test Site などがある (Reeves, *et al*, 1975)。

筆者が目指したのは、山地の残雪とそれに伴う原生的自然植生すなわち雪田植生についての、衛星データに基づく環境情報の抽出である。この分野の研究例が世界的に見てもほとんどない現状では、テストサイトとそこにおけるグランドトルース調査は極めて重要な役割を持つことになる。

3.3.2 テストサイトとしての鳥海山の特色

残雪が調査の対象になるため、ランドサット等の解像度に対応して、小さなものから大きいものまで、さまざまな広がりをもって大量に存在する必要がある。また、数多くの地上調査によって良質のグランドトゥースデータを蓄積するために、比較的交通が便利であり、さらに、調査の内容を吟味するための気象観測値その他の質の良い参照記録が十分に得られることが望ましい。

筆者による、リモートセンシング利用の積雪分布と積雪量の研究では(科学技術庁, 1976), 中部日本から東北各地の多雪山地の調査をした。それによって、鳥海山が多雪に伴う各種の現象を研究するために最も適した地域であることを認めたので、1978年以後の国立公害研究所の経常研究の一部として、研究を進めるに当たって、テストサイトとしての特性を再吟味した。その主な特徴は次のようになる。

1) 1冬季間の最深積雪が、海岸から山頂周辺にかけてほぼ15kmの間で、0mから最大40m以上へと大きな分布幅がある。このことは、表現上の解像度を57mにしたランドサットMSSの標準的バルク補正CCTを利用する場合、512×512画素の通常のディスプレイ上に積雪深の全分布幅が含まれることになって解析上有利である。また、現在までに、1冬季間の最大積雪深が40m以上になった例は、筆者の調査(土屋, 1976b)では鳥海山以外に飯豊山しかない。飯豊山はやや内陸に入るので、1画面に海岸線と山頂を入れるのは困難である。鳥海山と飯豊山に近い多雪山地である月山も、やや内陸になるため事情は同じである。

2) 大小さまざまな規模の残雪が多数存在して、雪田植生の発達には月山と並んで、東北地方だけでなく日本での最大規模になっている。したがって、残雪と植生の関係を、衛星データの解像度吟味と合わせて検討できる。

3) 参照データとしての気象観測値には、山腹にロボット両量計(6~9月の間作動)1台があり、山麓には数か所の気象庁AMeDAS観測施設もある。さらに、山頂の北約70kmに高層気象と永年気候観測を実施している秋田地方気象台、南西約30kmに酒田測候所及び南東40kmに新庄測候所があり、より詳細な観測値が得られる。また、周辺河川の洪水防止専用ダムや水路式発電所の流量及び気象観測値利用も可能である。

4) 保全すべき自然として、鳥海国定公園に含まれ、山頂から山麓を含む広い地域が山形県自然環境保全地域に指定されている。北部には比較的短期間の工事によって造成した山岳観光道路鳥海ブルーラインがあり、南部には環境保全を考慮しつつ、ゆっくりと工事が進められている山岳観光道路の湯の台一滝の小屋線があって、観光開発と自然保全に関する具体的問題があり、問題の種類も多い。

5) 蓄積された調査記録として、山形県の総合学術調査報告(山形県, 1972)、植生図(山形県, 1976)、及び第2回緑の国勢調査における植生図(環境庁, 1981)などがある。また、筆者のこれまでの調査結果(土屋, 1973, 1976 ab, 1977 ab, 1978 ab, 1980, 1981, 1982, 1983)も生かすことができる。さらに、最近、全国にさががけて作成された地すべり地形分布図の新庄地区(国

立防災センター, 1982)には鳥海山が含まれており, 地表面の解析の参考資料として活用できる。

3.3.3 グランドトランス調査

鳥海山を含むランドサットの1画面は酒田シーン(scene)(ただし3号まで, 4号からは変更)と呼ばれ, 約180 km四方が入っている。その全体をテストサイトとして利用できるが, ここでは鳥海山の山頂を中心にしてほぼ20 km四方に限定し, さらに地上調査を詳細に実施するのは, 最も大きな積雪深増加傾度を示す南斜面の一部に限定した(図16参照)。

この地域では, 積雪量が高度500 mぐらいから増えだし, 800 mを越すと, さらに増加し数mから10 m前後になる。そのためブナが低木化し, あるいはねじ曲がる。そして, さらに多い積雪のため, 温度的にはブナに続いて亜高山針葉樹林帯の出現する場所(1000~1200 m高度)にミヤマナラなどの高山低木林や雪田植生地帯が見られるようになる。四手井(1952)の提唱した偽高山帯である。このブナ帯から雪田植生の地帯にかけて, 山岳観光道路の建設が進められている。前述した, テストサイトとしての鳥海山の特色を集約したとも言える場所であるが, その雪田植生地帯を中心にして, 昭和53年から昭和57年まで5年間, 地形・土壌・植生・残雪分布に関して, 表7に示すように調査を実施した。

本研究では, 残雪検出とその解析技法そのものが全く新しいものであったので(土屋, 1982)技法の追試が必要であった。また新技法の利用分野についての開拓を示唆できる研究も重要であると考えた。

テストサイトを対象にして撮影地点を固定した定点写真や, 撮影地点を移動しながらの地上写真を, 季節と年次を変えながら多数蓄積することによって残雪を含めた雪田植生地帯の年々の変動特性が吟味できる。その吟味結果と衛星データの解析結果との照合のために, グランドトランス調査実施の意義がある。

空中写真は, その利用方法によって, それ自体がリモートセンシングデータとなって解析の材料ともなるが, ここでは主としてグランドトランスデータとして用いた。空中写真が, もし衛星の探査時刻と同期又は近い時間帯に得られていれば, 地表環境を高い解像度(対地高度の千分の1~1万分の1)で表示できるからである。このためには, 2万5千分の1地図作成用の, 測量規格空中写真か, あるいは高高度(1万m以上)からの鉛直写真が適しているが, 多額の経費がかかるのと, 雲による障害の多い山地での, 衛星との同期を成功させることはかなり困難である。ここでは, 小型飛行機等による斜め撮影を導入することで, 同期又はそれに近い機会を増加させた。良好な衛星データが入手できた場合に, 空中写真に基づくグランドトランスデータを作成した。具体的には, 他の調査その他の鳥海山周辺の飛行計画のいくつかの中で得られた空中写真を使用したのであるが, このことは月山についても同様である。

雪田植物群落地帯の地形と土壌については, 植生との関係を見るための調査であり, 直接に衛星データと照合するものではないが, 土壌水分調査によって, 道路に接した雪田草原が後述(p.55)

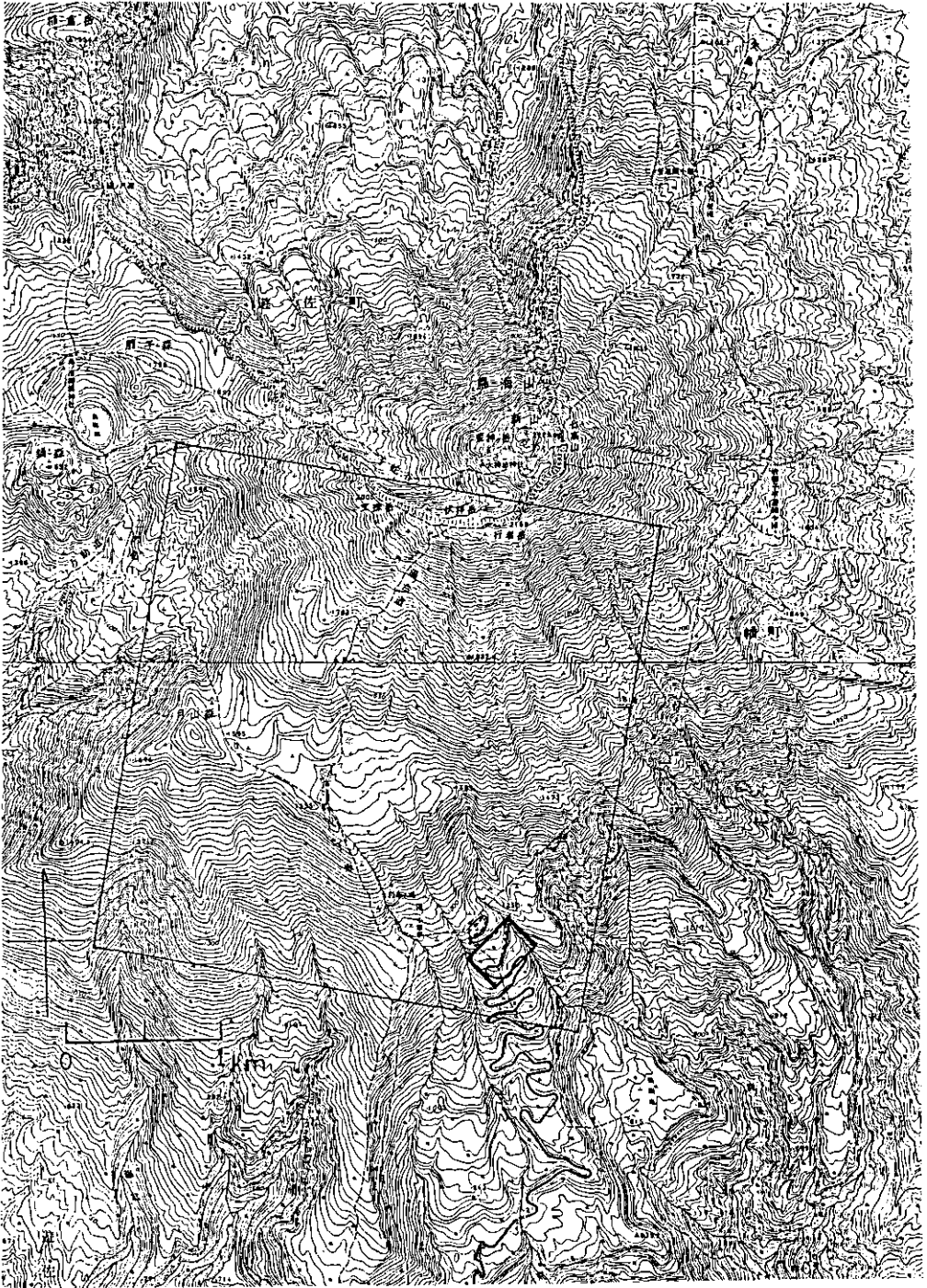


図16 鳥海山のテストサイト (小さいわくは図17の植生調査地区)

表7 鳥海山テストサイトにおけるグランドトールズ調査
〔付：比較地域月山を含む〕

調査項目 年次	残雪分布の遠距離定点 写真と現地周辺写真	空中写真による残雪 分布図	雪田植物群落地帯の 地形と土壤	雪田植物群落 地帯の植生
1978	山頂南約11kmの 定点と工事中の湯の 台一滝の小屋線道路 の周辺			
1979	1978と同じ		電探による土壤探査	
1980	1978と同じ		電探による土壤探査, 年々変動	永久方形区の設定と 植生調査
1981	1978と同じ	9月2日の鳥海山南 斜面の残雪分布図	地形調査	永久方形区内の植生 推移と周辺植生調査
1982	1978と同じ	7月9日の月山南東 斜面の残雪分布図	月山の地形概況調査	永久方形区内の植生 推移と月山の雪田植 物群落との比較

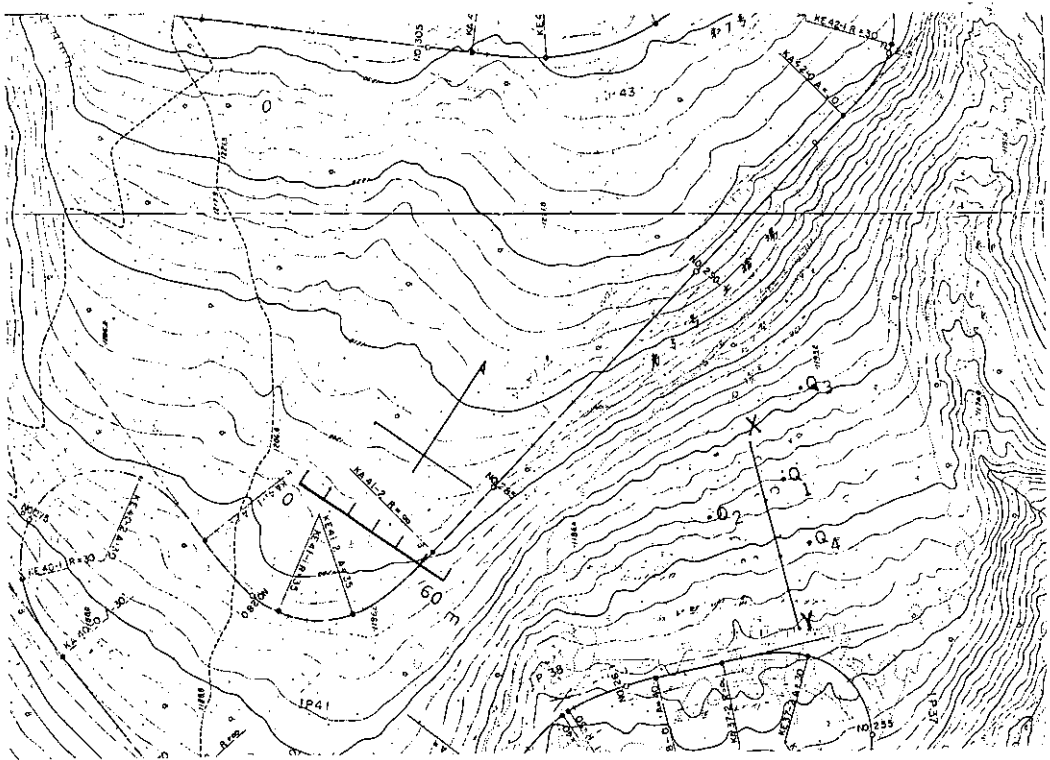


図17 永久方形区の配置図 (Q₁ ~ Q₄, 線XYは大地比抵抗測定線)

のように、融雪期の湿潤状態を過ぎるとやや乾燥する傾向のあること、したがって雪田植生地帯の中で最も人為的圧力に弱いものであることがわかった。

植生調査は、二つの理由によって実施した。すなわち、第1は、環境庁の第1次、第2次の「緑の国勢調査」に関連しての現地調査ではカバーできなかった部分であったこと、第2は、道路開発等によって近い将来人為的影響の現れることのほぼ確実な地域の事前調査の役割となり得るからである。したがって、永久方形区を図17のように設置して、3年間の推移を見る一方で、将来に予想される変化に対する対比資料になり得るようにした。また、国の天然記念物に指定されている月山における、代表的な雪田草原である弥陀ヶ原との比較によって、テストサイト内のグラントルースデータとしての植生の性格を明かにしておくことを考慮した。草原地帯の55~57年調査の結果、明らかになったことをまとめると次のようになる。

- 1) 鳥海山や月山の登山路の周辺で認められたような、踏みつけなどによる、人為的破壊現象(石塚ら, 1972, 1975)は、現在のところ全くない。すなわち、完全に原生的自然状態である。
- 2) 月山の弥陀ヶ原と比較すると、表8のようになるが、その特色を要約すると、
 - ① 月山弥陀ヶ原で確認されている種類で、鳥海山の永久方形区とその周囲の草原で確認されていない種類はカワズスゲ・ミヤマイヌノハナヒゲ・トキソウ・コシジオウレン・エゾシオガマである。クロウスゴ・チシマザサ・ハクサンシャクナゲ・ウラジロヨウラク・ミネカエデは方形区には見られないが、調査地草原の周辺に発達する亜高山落葉低木林の主構成種である。
 - ② 永久方形区とその周囲草原で確認されている種類で、月山弥陀ヶ原で確認されていない種類はハクサンオオバコ・ネバリノギラン・ヒゲノガリヤス・タテヤマスゲ・ハクサンボウフウ・シラネニンジン・オオバショリマである。
 - ③ 月山弥陀ヶ原の湿原と鳥海山の永久方形区に発達する群落はヌマガヤイワイチョウを中心とする植生に区分できるが、その種類組成には著しい差違が識別できる。すなわち、永久方形区のヌマガヤイワイチョウ群落は、山腹の緩傾斜や平坦地であるが、比較的排水の良好な立地に発達しているのに対して、月山でのそれは、地形条件は同一であるが排水が著しく不良であるため、水分過多の立地に適応した植生が発達している。

全体としては、月山の弥陀ヶ原の場合と類似しているが、排水がやや良好であるため湿原状になっていない。このことは土壤の電気抵抗計測に基づく電探解析とも一致し、図18に示した土壤構造のもとで、残雪量その他の原因により、地表近くの水分量は年によってかなり変動があり得ることになる。石塚ら(1972, 1975)の見解に従えば、雪田植物群落の中で最もデリケートであり、人為的圧力に最も弱いものであるし、同じ自然度階級10に属する高層湿原に比べて、さらに人為的影響を受けやすい植生地帯であることを示している。

図19~21には、永久方形区周辺を含むテストサイトの景観を示した。

表8 月山弥陀ヶ原湿原と鳥海山テストサイトの雪田草原との比較

調査地	月山(弥陀ヶ原)										鳥海山(方形区)				区域外
調査区番号	71068	71129	71151	71161	71154	71153	71118	71174	71131	71155	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	
海拔高(m)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1100	1100	1100	1100	
草本層高(cm)	35	40	50	35	40	25	20	65	30	20	45	45	45	45	
草本植被率(%)	100	100	98	100	100	100	100	100	100	100	90	98	100	100	
出現種数	17	9	18	13	13	15	12	11	11	14	11	9	14	5	14
ヌマガヤ	4	5	5	3	5	4	1	1	5	5	2	4	4	4	—
イワイチョウ	2	1	+	4	3	3	2	3	1	3	3	2	2	3	—
ショウジョウスゲ	3	2	3	4	4	4	3	2	1		2	2		1	—
チングルマ				1	1	2	1		1	3	+	3	+		—
イワカガミ	+	+	2	2	+	1		4	+	+		+	+		—
シロバナトウチソウ	+	1	1	1	+	1	+	1	+	+	2	1	3	1	—
ニッコウキスゲ	1	1	1					2					1		—
コバイケイソウ			1					4					1		—
ショウジョウバカマ		+	+	+	+	+		+	+	+					○
エゾオヤマリンドウ	+			+				+	+						○
タチギボウシ	2	3	2	+	2	1	+	2	+	+					○
イワショウブ	+	+													○
キンコウカ	+		+	1	+	1	4		3	1					○
モウセンゴケ				+	+	+	+			+					○
ミネハリイ	+										2				
カワズスゲ						1				1					
ミヤマイヌノハナヒゲ						+	1								
ミタケスゲ	1							+							○
トキソウ			+												
ウメバチソウ	+														○
ヒナザクラ					+	+				+	1				—
ミヤマリンドウ	+				+	+	+		+	+	+	+			—
ミツバオウレン			1	+	+	+				+					○
コシジロウレン	+														
クロウスゴ								+							
エゾンオガマ	+														
チシマザサ			1												○
ハクサンシャクナゲ			+												○
ウラジロヨウラク	+		+	+											
ミネカエデ			+												○
アカモノ			+	+						+					○
ツマトリソウ			+												○
ハイゴケ							1				r	r			—
ハクサンオオバコ											3		+		—
ネバリノギラン												+	+		—
ヒゲノガリヤス													1	1	—
タチヤマスゲ													+		—
ハクサンボウフウ													1		—
シラネニンジン													1		—
オオバショリマ													+		—

区域外欄の一は調査省略 調査担当は吉野智雄・小笠原俊彦

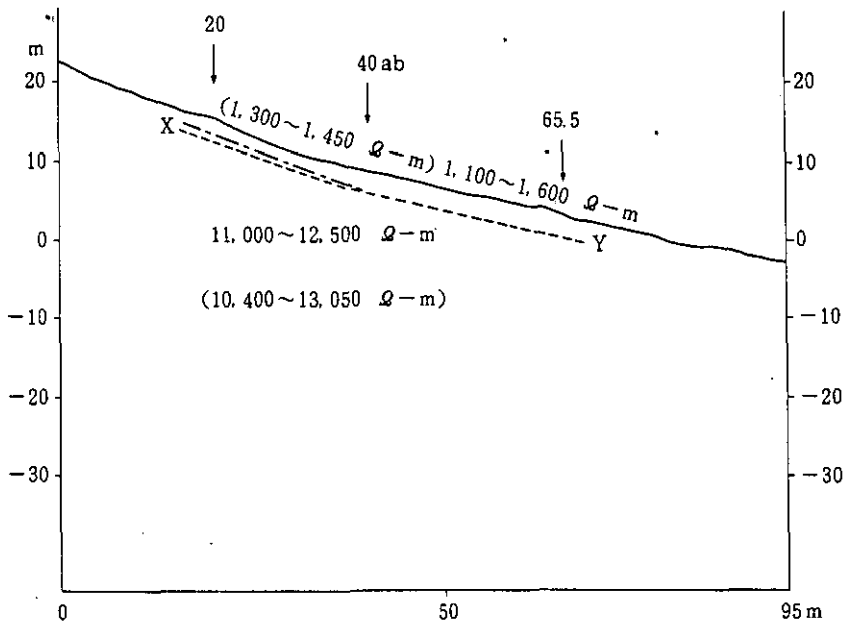


図18 テストサイト雪田草原の大地比抵抗測定法による地盤断面図
 (破線は1979年, 鎖線および()は1980年)

大地比抵抗測定には, 横河電機製 TYPE-2344 電気探査器を使用し, ウェンナー系平均4極法による垂直探査を実施した。測定者は(株)建設地質コンサルタント(東京)である。1980年には湿じゅん度の同程度の部分が前年よりやや薄くなった。XYの傾斜によって湿原よりやや乾燥しやすいものと判断できる。



a (1981年9月15日)



b (1980年9月26日)

図19 テストサイト周辺(南から北を見る, a: 図17XY 付近, b: 図17Q1 付近)



a (1980年9月22日)



b (1980年9月23日)

図20 テストサイトの雪田草原の周辺(北から南を見る, a: 高度1,200mより, b: 高度1,600mより)



a シロバナトウチソウ, ニッコウキスゲ, チングルマ (1981年9月17日)



b チングルマ, イワイチョウ (1982年9月4日)



c イワイチョウ, アオノツガザクラ (1981年9月17日)



d ヌマガヤ, イワイチョウ (1982年9月4日)

図21 雪田草原の植物 (bとdは吉野撮影)

第4章 衛星データによる解析事例

4.1 衛星データの収集

日本の上空で作動し、かつそのデータを公開している人工衛星の中で解像度の高いのはランドサットシリーズであるが、同様に米国 NOAA が所管している気象衛星ノア (NOAA) のシリーズも、約 1 km の解像度の熱赤外センサーがあるため環境調査用としてしばしば使われる。この研究では、表 9 に示すデータを収集して事例解析に用いた。

1972 年 7 月旧名称アーツ (ERTS: 地球資源衛星) の名前で打ち上げられたランドサット 1 号、及びその次の 2 号の一部については、1979 年の宇宙開発事業団の受信開始前であったので、米国で受信したものを使用していた。そのため、日本上空で走査した記録はそれほど多くない。また、データ提供の形態も限定されていて、CCT 型式に処理できているものはかなり少なかった。表に示した 2 件がフィルムのみであるのはそのためである。

1979 年 1 月からは、宇宙開発事業団が埼玉県鳩山町 (当時は村) の受信設備によって、直接受信し、さらに幾何補正を施して、地図上にオーバーレイ解析の可能な CCT を提供するようになった。また、最近是利用案内も整備された (宇宙開発事業団地球観測センター, 1982) ため、従来、非常に手数と経費のかかった、解析のための前処理作業が大幅に軽減された。直接受信によって増加した日本周辺の大量の衛星データの中から、解析に適したデータを利用することが可能になったが、特定の地方について、特定のテーマに適したものは、やはりそれほど多くはならない。この研究の主テーマとなる残雪解析は、5 月から 9 月までが最適期間であるが、日本の暖候期の特色として、雲の多い日が多く、特に海岸に近い山地で顕著になる。また、土曜等の受信停止日、衛星自体のセンサーその他の不具合等もあって、18 日に 1 回の割合で同一地点の上空を通過はしていても使えるものはかなり限定される。

結局、残雪の数値解析に用いたのは、MSS の 1979 年 5 月 4 日と 22 日、1980 年 6 月 12 日、1981 年 6 月 16 日、1982 年 5 月 15 日と 7 月 8 日の 6 シーンである。1979 年の 2 シーンを使って、3 章に略述したように、残雪解析のためのいくつかのモデルを開発し、1980~1982 年の 4 シーンについては、モデルの適合性を検証した。

RBV については、さらに使えるシーンが限定されたが、1981 年 7 月 31 日と 9 月 9 日についての数値解析の試みと、空中写真に基づく残雪分布図との照合ができた。

気象衛星ノアのシリーズでは、データの入手方法、内容型式その他の面で、ランドサットの場合同かなり違う。受信は気象庁が東京都の清瀬市で受信し、CCT の一般への公開は日本気象協会が行う。CCT の内容は幾何補正がなされていないのと、同じ地域を同じ姿勢で周期的に走査する

表9 収集した衛星データと主要解析テーマ

ランドサットMSS			
日付(年・月・日)	衛星番号	データ形式	備考:解析テーマ, 発表論文年次等
1. 1972. 8. 29	L-1	フィルム (N)	米国受信データであり, かつCCTは作成されなかった
2. 1978. 7. 29	L-2	フィルム (N)	同 上
3. 1979. 5. 4	L-2	CCT, フィルム (N, P, C)	残雪分布解析 } 残雪消失モデル(土屋,1981) 残雪深度分布解析 } 残雪流出モデル(土屋,1983)
4. 1979. 5. 22	L-2	CCT, フィルム (N, P, C)	
5. 1980. 6. 12	L-3	CCT, フィルム (N, P, C)	残雪深度分布解析
6. 1980. 9. 19	L-2	CCT, フィルム (N, P, C)	ノアデータと対比
7. 1981. 4. 23	L-2	CCT, フィルム (N, P, C)	ノア熱画像解析と照合 (土屋, 1982)
8. 1981. 6. 16	L-2	CCT, フィルム (N, P, C)	残雪深度分布解析, 雪田植生と対比 (土屋, 1983)
9. 1981. 8. 9	L-2	CCT, フィルム (N, P, C)	
10. 1982. 5. 15	L-3	CCT, フィルム (N, P, C)	残雪深度分布解析
11. 1982. 7. 8	L-3	CCT, フィルム (N, P, C)	残雪深度分布解析, 7月9日 月山残雪分布図 (航空写真による) と照合

ランドサットRBV			
日付(年・月・日)	衛星番号	データ形式	備考:解析テーマ, 発表論文年次等
12. 1979. 3. 20	L-3	CCT, フィルム (N, P)	サブシーンB 山地と平地の積雪境界
13. 1979. 11. 9	L-3	CCT, フィルム (N, P)	サブシーンB 新庄市付近の盆地霧
14. 1981. 7. 31	L-3	CCT, フィルム (N, P)	サブシーンB 新庄市郊外, 庄内地方大規模農道 残雪分布解析
15. 1981. 9. 5	L-3	CCT, フィルム (N, P)	サブシーンB 9月2日鳥海山残雪分布図 (空中写真による) と照合
16. 1982. 5. 15	L-3	CCT, フィルム (N, P)	サブシーンB, D 機能低下

NOAA			
日付(年・月・日)	衛星番号	データ形式	備考:解析テーマ, 発表論文年次等
17. 1980. 9. 19	N-6	CCT	L-2 データと対比
18. 1981. 4. 23	N-6	CCT	} L-2 カラー合成画像等と照合(土屋,1982)
19. 1981. 4. 23	N-6	CCT	
20. 1982. 5. 15	N-7	CCT	L-3 残雪解析と対比
21. 1982. 7. 7	N-7	CCT	} L-3 残雪解析と対比
22. 1982. 7. 8	N-7	CCT	

CCTはL-2, L-3についてはバルク幾何補正をしたもの, N-6, N-7は無補正, フィルムはN:ネガ, P:ポジ, C:合成カラー。なお, 1979年以降のランドサットデータはすべて宇宙開発事業団地球観測センター提供のものである。

ランドサットとは違っているため, 地図オーバーレイ解析は困難であるが, 1日2回は日本全域をカバーするという特色がある。

この研究では、前述したように熱赤外波長帯が使えるという特色を利用して、ランドサットによる解析の補助手段としての役割を検討した。

4.2 1979年の残雪解析

第3章に説明した各種の積雪モデルを使うと、残雪に関するいくつかの応用的解析が可能になる。ここでは前述したモデルへの具体的数値代入上の問題と応用分野について述べる。

(1) 積雪面積

陸上の無雪地帯のCCT数値の平均は、バンド5の場合図13 (p. 43) に示したように20~40にはいることが多い。一方、新雪又は深い残雪では上限の127を示す。両者のほぼ平均となる75~80を積雪面積率50%と仮定して、それを積雪境界とする方式がある(例えば、武田, 1983)。他方、残雪の深い部分の検出に重点を置く場合には、上限に近い数値が適している。境界数値の決定は、定点写真に基づく季節的雪線の推移を地図上に落として、試行錯誤的に定める経験的手法によった。

雪解けがまだそれほど進んでいない5月4日については、かなり高めの124に、雪解けがかなり進んだ1979年5月22日については、100にしたが、いずれも前述の平均値法より高めに設定したことによって、残雪面積を内輪に見積もったことになる。5月初旬から下旬へと数値が下がったのは、積雪境界付近での樹木の芽の生長など、反射率低下要因を反映したものと思われる。

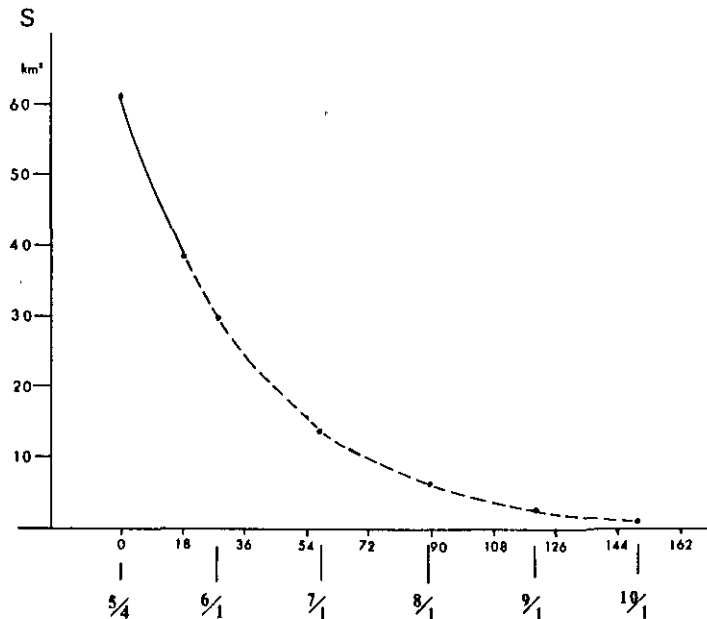


図22 残雪面積 (S km²) の季節推移 (土屋, 1981 より)

これらの数値の代入によって、5月4日の残雪面積 S_0 は 61.1 km^2 に、18日後の5月22日の S_{18} は 38.4 km^2 になった。 S_0 と S_{18} を境界条件にして前述 (p. 45) の融雪モデル(1)式を解いて、さらに t 日後の日付けの残雪面積を表現したのが(2)式：

$$S = 61.1 e^{-0.0258t} \quad (2)$$

であるが、これを使うと、6月1日 ($t=28$) は 29.8 km^2 、7月1日 ($t=58$) は 13.7 km^2 、8月1日 ($t=89$) では 6.2 km^2 、9月1日 ($t=120$) は 2.7 km^2 、そして10月1日は ($t=150$) になって 1.3 km^2 になる (図 22 参照)。

(2) 式は残雪の季節開始後から残雪の消失の若干前までの期間について成立することを想定したものである。任意の日の残雪面積が求められれば、残雪面積との関係が深いと考えられる雪田植生の面積算出も可能であるが、そのためには、どの時期の残雪をもって指標となし得るかの研究と、面積算出のモデルの精度も調べる必要がある。

この章のはじめにも述べたように、18日ごとに走査している衛星から得られるデータのうち、解析に使えるものはかなり少ない。したがって、モデルによって予測した残雪面積を衛星のデータによって検査することはできなかった。また、航空機による空中写真によって残雪分布図を作成して照合すれば、さらに良い検証となるが、1979年の場合には経費等の関係で実施できなかった。しかし、この照合方式は次年度以降にできるだけ実施することを計画した。

間接的照合作業になるが、融雪水の河川流出を解析することでモデルの検証を考えた。もし月ごとに消雪深 (m) が得られれば、各月ごとの消失体積 $V_n (\times 10^6 \text{ m}^3)$ が次式：

$$V_n = \frac{1}{2} A_n (S_n + S_{n+1}) + A_n S_{n+1} \quad (4)$$

によって近似的に求められる。ここで、 $S (\text{km}^2)$ の添字 n は月番号を、 $A_n (\text{m})$ は n 月の月間消失深 (日々の合計) を示す。

図 23 の縦軸の5~9月の月ごとの消雪深 (m) と横軸に示した月ごとの残雪面積 (km^2) とによって囲まれた面積が(4)式に相当し、月ごとの消失量として図示できる。5月については5月4日からとし、10月以降については越年性残雪となるため融雪量は無視した。算出量は5月 136.2、6月 108.5、7月 59.7、8月 31.2、9月 10.0 となって、5~9月の消失総量は $345.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ となる。

この消失総量に対して、残雪の平均密度を 0.5 とすると、5月4日以降の融雪流出量は約 1 億 7,000 万 t になる。 61.1 km^2 の面積で平均して 2,782 mm の積雪水量があったことになる。5月3日までの流出量が5月4日以降の半分であったとしても (東北南部、北陸地方の水力電源地帯では、同じであるかむしろ多い。), 4,000 mm を超えることになる。一般に、平地から山地にかけての積雪増加はほぼ直線的であるため、平地での測定値約 2,000 mm を考慮すると、山頂に近づくにつれて 10,000 mm の降水量が雪の形で降ることになる。図 23 にも示した月ごとの消雪深の算定量によって上述の値は変るが、多数の断続的測定の集積であって誤差も大きいと考えられる(土

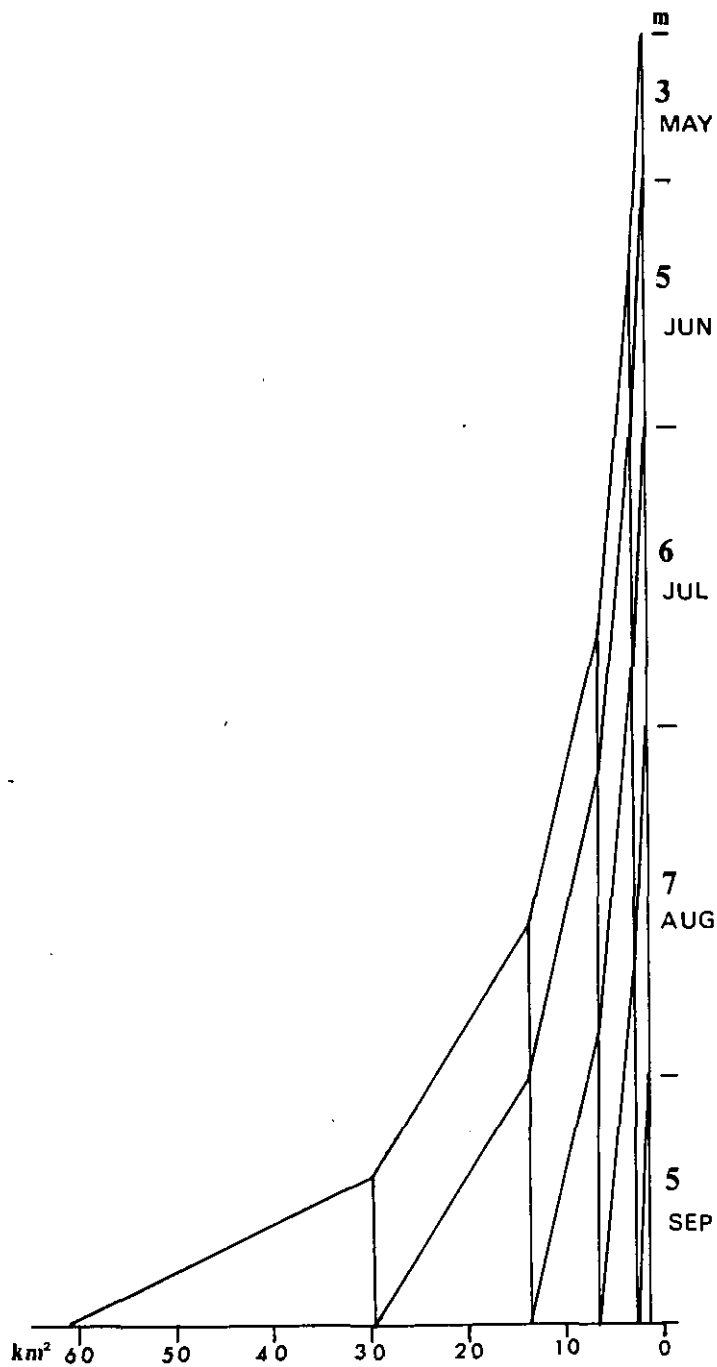


図23 月間消雪深(m)を仮定した消雪量(10⁶m³)の季節推移算定図
(土屋, 1981より)

屋, 1981)。したがって, ダム湖等の信頼性の高い流量記録による検証が望ましい。

幸い, 鳥海山南斜面の一部を集水域とする洪水制御専用の月光川ダムが1978年に完成し, 1979年以降の流量記録を解析することができた(土屋, 1983)。それによると, 年間降水量(雨+雪)は山頂において, 約20,000mmとなり, 雨と雪がほぼ同量であったとして, 約10,000mmが雪として降ることになる。現在, 年降水量の世界記録は平年値がハワイ諸島カウアイ島の11,455mm, 1年間記録はインドのチェラプンジにおける26,461mmである(気象学ハンドブック, 技報堂, 1959による)。いずれも山地であり, 湿潤気流の強制上昇に基づく対流活動の盛んな地域で雨の形で降る。鳥海山の場合, 雪が加わることで, 前述の記録に匹敵又はそれを越える降水現象が発生しているものと言える。

流出解析によっても, 衛星データによる残雪面積等の算定結果が概数としてほぼ妥当であり, 新しい事実認識の手がかりにもなり得ることが示された。

(2) 残雪深度

3章で説明したように, 積雪が新しい状態では, 積雪深を衛星データによって算定する場合の限界は, せいぜい15~50cmであると言われてきた。しかし, 春から夏にかけての残雪の季節になると, 積雪の老化と氷に近づく変態とによって長波長帯(バンド7付近)で反射率が低下することを指摘し得たので, その現象を非常に厚い残雪の深度解析に用いる方法を開発した(土屋, 1981)。解析事例では, 3章で説明した(3)式を用い, 1979年5月22日のMSSデータに適用した。巻末添付の図24は, 最終的な地形図オーバレイの出力結果である。試行錯誤的な計算値の深度割当であるが, (3)式について $(D-375) \times 0.1$ という深度(m)換算をして非常に深い(10m以上), かなり深い(5~9m)というような表現をすると指標Dに基づく深度の具体的理解として得られる。深度の数値表現については, 375という定数(残雪境界値)と0.1という係数が事例ごとに変わる恐れがあるし, 検証技術そのものが未開発であるため, 表現上の精度については, 原理上の制約や間接的検証を検討する必要がある。

まず, 残雪領域の地理的精度についてはかなり良いと言える。すなわち, 地形的凸部であるりょう線やいくつかに分かれた外輪山の山頂部及び火口丘頂上など, 従来から積雪が少なく, 残雪季節には早くから露出している地表は, ほとんどすべて積雪無しに表示(つまり無印刷)されている。他方, 従来から越年性の残雪の存在等によって, この時期の深度が20m以上もあることの判明している部分はすべて非常に深い表示区分になっている。

なお, 図24の作成過程で国土地理院地形図の45年版を調べたが, 前述のような一致がやや悪く, 新しい52年版に変えたところ一致状態が良くなった。新しい版の地図では空中写真測量に基づく2万5千分の1地図を基にして5万分の1地図を編集しているため, 古い版に比べて精度は向上している。したがって, 衛星データの解析結果が新しい版に良く適合していたことは, 間接的に衛星データの地理的精度が良いことを示している。



図26 1979年5月22日のランドサット偽似
カラー合成画像（酒田シーンより）



図25 1979年5月4日のランドサット偽似
カラー合成画像（酒田シーンより）

出力結果の地理的精度の良いことによって、従来、必ずしも明確に認められていなかった、山地の残雪分布についての微細な解析が可能になる。例えば、日本海に面した山地の冬季季節風(主として北西又は北の風向)に対して風下斜面に積雪が多いという現象である。この図では、山体の全体と微細に見た場合の個々の山りょうに対して、風下斜面に多いことが認められる。そしてそれは風下斜面が日当たりの良い南斜面であっても例外でない。そのため、全体として南斜面であり、かつ微細構造的に西側にりょう線のある風下斜面の山腹において深く、必ずしも谷底でない例が多い。

この現象は、地上調査ではかなり前に判明していたが(土屋, 1976 b, 1977 a), 林野庁や国土地理院の撮影した空中写真によっても判読できるものである。残雪深度分布図は衛星データによって、山地積雪分布の特色を大規模から小規模(恐らく100~200 m単位)に至るまで、客観的に示したものと言える。

なお、100万分の1地形図と同縮尺で作成される、宇宙開発事業団のカラー合成写真は、上述の解析のためのCCTにおけるline番号とpixel番号の範囲を定める際の参考にしたり、雲などの解析上の障害状態を調べるために使用した。写真の光学的制約のため、CCTのような画素ごとの分離ができないのと、CCTに入っている128階級の反射輝度区分に相当する詳細な表現はできないが、解析対象地域全体を含めた広い範囲を概観するのに有効である。図25, 26に5月4日と22日の偽似カラー合成画像を示した。これらはバンド4, 5, 7を合成して、赤外カラー写真に近い表現にしたものである。鳥海山と月山の残雪が多いため、5月22日にはほかの山々ではほとんど残雪がないか、あるいは非常に少なくなっていることがわかる。

積雪深表示の精度については、流出解析における残雪の月ごとの融雪深によって間接的に検証できるが、最深積雪と年融雪深のそれぞれの年々変動が大きいことを考慮すると高い精度は期待できない。10 m以上という表示は、そのような機会が多いと見る方が実用的である。それでも次章に雪田植生との関係で説明するように、従来は知ることのできなかった情報として有効である。

4.3 1980~1982年の検証実験

1979年5月22日のランドサットMSSデータによる残雪深度分布解析は、多くの部分で経験的知見に基づくデータを入れた上の試行錯誤的過程によって進められたものであった。したがって解析モデルや代入する定数等について、年次を変えあるいは同種のセンサーでも衛星を変えて検証することによって、手法の妥当性を判断する必要がある。また、対象地域を他の山地に変えての拡張型実験も必要である。このため、1980年6月12日(L3:ランドサット3号)、1981年6月16日(L2)、1982年5月15日と7月8日(L3)のデータを使用した。

前述したように(p. 42), (3)式による残雪深度分布解析は、適合期間は残雪の厚い部分で低温の表面が高い反射率を示すという現象を利用している。したがって、全域が低温になっている厳冬から初春にかけては利用できないし、また残雪が縮小して、厚さも減少する盛夏の候には、大部

分が融点すなわち 0°C になっていて、水分を多く含むので、波長の長い部分での反射率は低下し、厚さ区分の役割は果たせなくなる。

1979年5月4日と22日の例では、5月4日の積雪分布域の内側に5月22日の分布域が入る。しかし、残雪の厚さについては、5月22日に消失あるいはかなり薄くなる部分についても、予想される厚さより厚く表示される部分がある。したがって、5月初旬以前に適用するのは不適當になる。

5月下旬以後では、1980年6月12日、1981年6月16日及び1982年7月8日が検討の対象になった。6月12日と6月16日はテストサイト付近で図27と図28のように表示され、テストサイト付近の残雪深度についての、従来の知見(土屋, 1976b, 1977b)やグランドトルースデータとしての多数の写真記録との一致も良い。しかし、7月8日になると、縮小した残雪領域の表示は、面

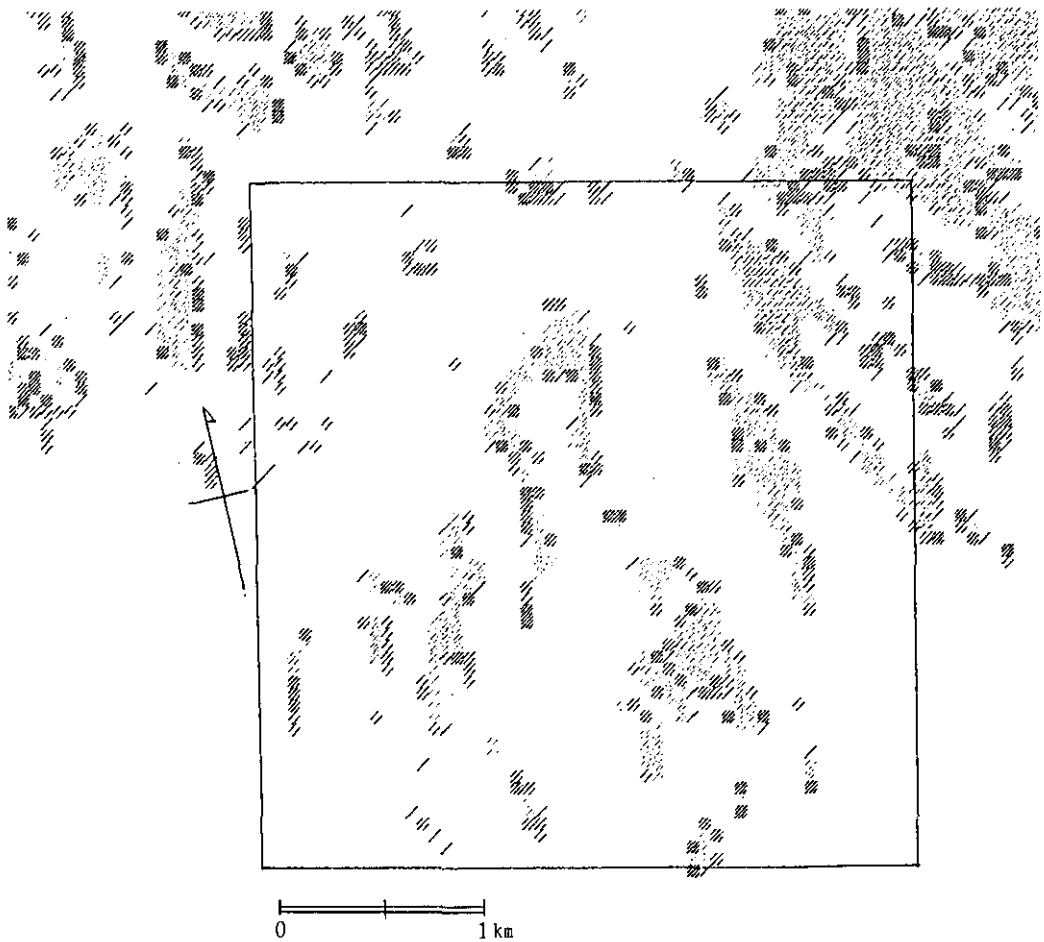


図27 テストサイト周辺の残雪深度階級区分図 (1980年6月12日)
凡例は図24と同じであるが、カラー原図をモノクロにした。

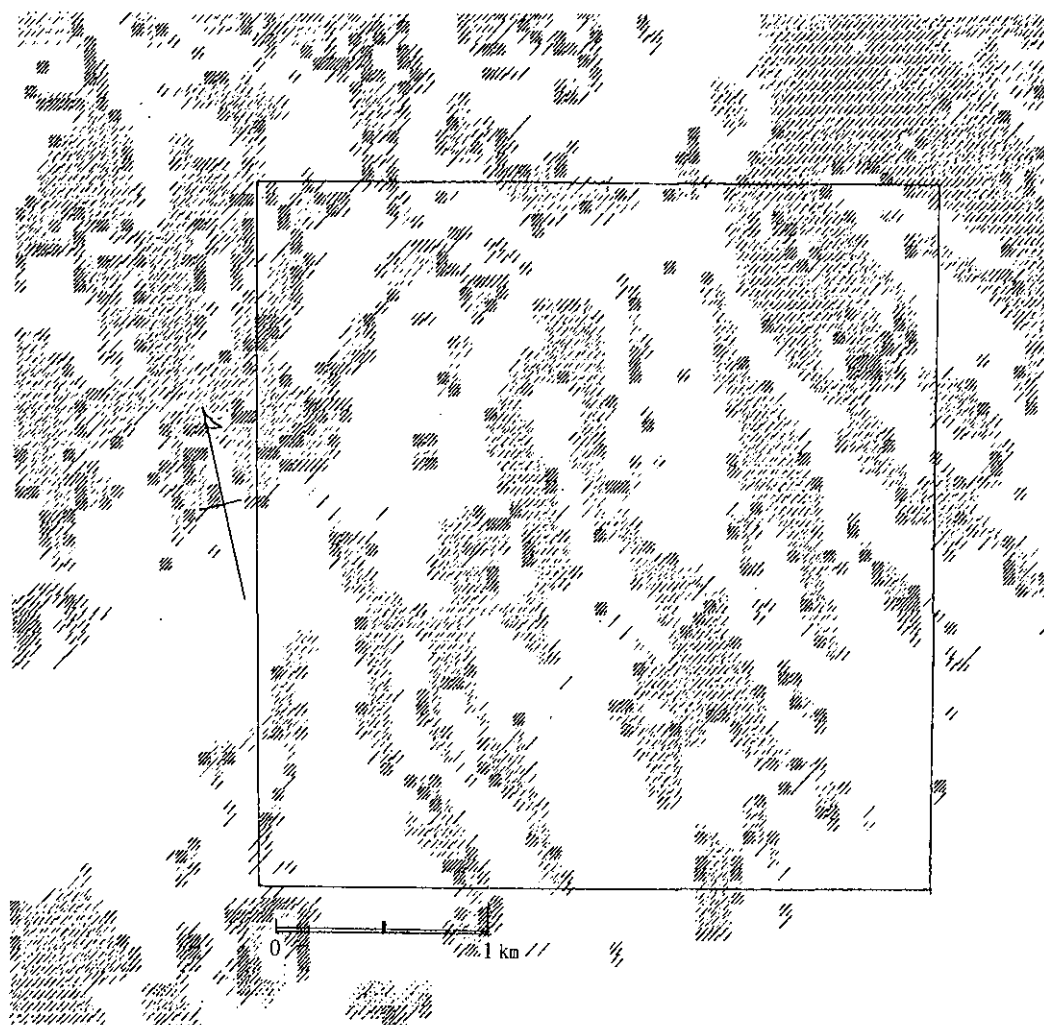


図28 テストサイト周辺の残雪深度階級区分図 (1981年6月16日)
 凡例は図24と同じであるが、カラー原図をモノクロにした。

的解像力の範囲でかなり良いが、厚さについての表現は、6月の例ほどには事実を反映していない。したがって7月初旬以後には適用が困難になる。

以上の5月から7月に至る事例からは、5月中旬から6月下旬までのほぼ50日間で、1回の走査データのみで、厚い残雪の分布と厚さの程度を、残雪モデルによって定量的に表現できる期間であることが示唆できる。

次に問題になるのは、経年的なあるいは年々の変動である。従来、山地の積雪については十分な根拠がないままに、年々ほぼ一定量の積雪水量があるものとの見方が多かった。これは、河川流量等に雪解け季節の大きな年々変動が見当たらないという結果に基づいていたものである。し

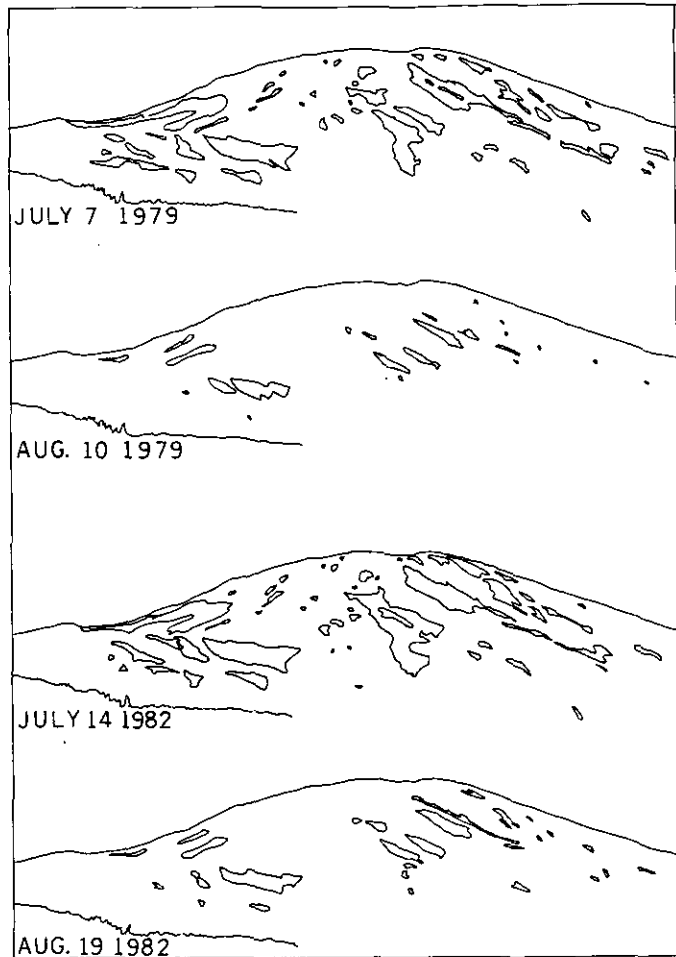


図29 定点写真に基づく鳥海山南斜面の残雪分布

かし、多雪山地における残雪分布には図29のような年々変動や、多雪地帯を主流域にしたダムや水路式発電所の記録からは、年々の積雪量にかなりの変動のあることが判明した（土屋，1983）。

1979年、1980年及び1981年の間に、テストサイトの残雪量は、1979年を最低にして増加を続けたが、図27と図28はそれを反映している。すなわち、1981年は1979年の場合よりも25日遅い日付けの分布であるが、1979年のもの（図24参照）とあまり差はない。1980年については、1981年より少ないことは示されているが、1979年と比べても少ない。この場合、日付けの差を考慮すると、判断はつき難い。なお、1980年がL3であり、他はL2であることも考慮する必要がある。

衛星が違うと、同型式のセンサーを使用していても、基準が同じであるとは言えないことになる。つまり、同じ物質に対して、若干違うCCT数値を示すことがあり得る。1980年6月12日の

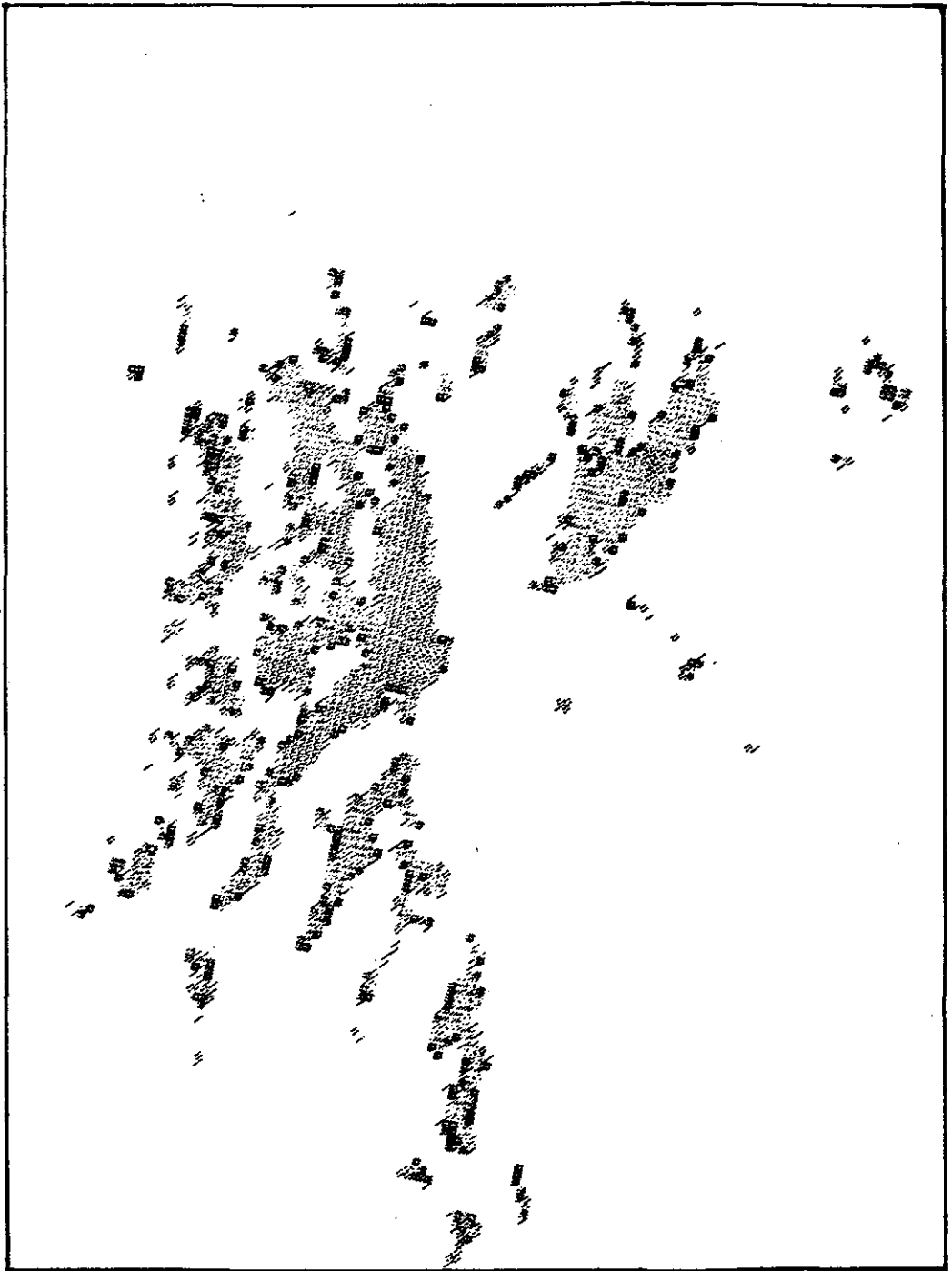
例では、水域表示の数値がL2の場合よりも3~5低目であった。もしCCT数値の全部について、同じように低目にずれていたとすれば、事例解析の1980年は残雪量が1979年や1981年に比べて少な目に表現されたことになる。

上述のように、今後検討の必要な部分があるが、(3)式に基づく残雪深度分布解析は、鳥海山について、ほぼ安定して使用し得ることがわかる。

鳥海山について成立した解折手法が、他の山地についても適用できるか否かを検証するために、鳥海山と並んで多雪山地として知られる月山について拡張実験をした。月山は山頂高度1,980mで鳥海山の2,237m(新山の山頂)よりやや低い。越年性の残雪がいくつかあり、多数の残雪のなかには夏スキーで著名な姥沢グレンデがあり、その上部に連なる雪田植物群落の人為的破壊が問題になっている(石塚ら, 1975)。

図30は(3)式によって1980年6月12日を、図31は1982年7月8日を示したものである。図31では図30と同じ手法で出力したものを、同年7月9日の斜め空中写真による残雪分布図と照合するために、等値線図に書き直して表現した。L3ではやや少なめに表現される可能性を示唆したことと矛盾しないし、また大面積の残雪はほぼ正しく表現できていることがわかる。図30についても、従来からの月山についての知見(土屋, 1973, 1976b)とほぼ一致する。すなわち、越年率の高い残雪はすべて、分布図の領域内にある。また、りょう線の風下側に吹きだまり型の残雪が大量に推積するという特色は、鳥海山の場合と同様である。なお、これら残雪分布図は雪田植生の分布(石塚ら, 1975)とも符号する。

結局、鳥海山の南斜面をテストサイトにして開発した、残雪深度分布図作成のための演算用の残雪モデルが、大筋において月山でも成立することが判明した。したがって、今後はモデルの簡略化を含む改善、さらに他の山地に拡張しての検証実験を進めることによって、安定した技法にすることが期待できる。



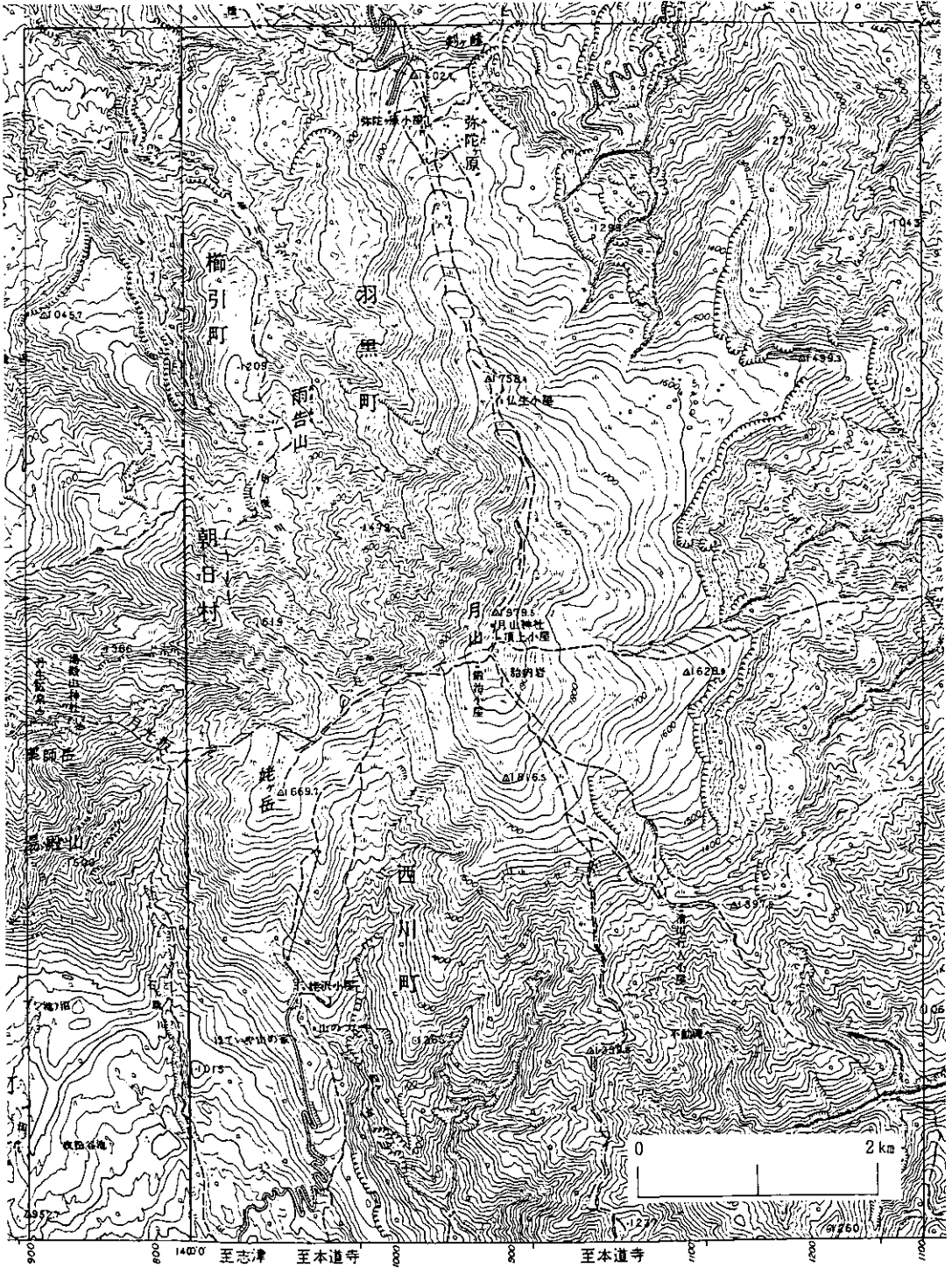
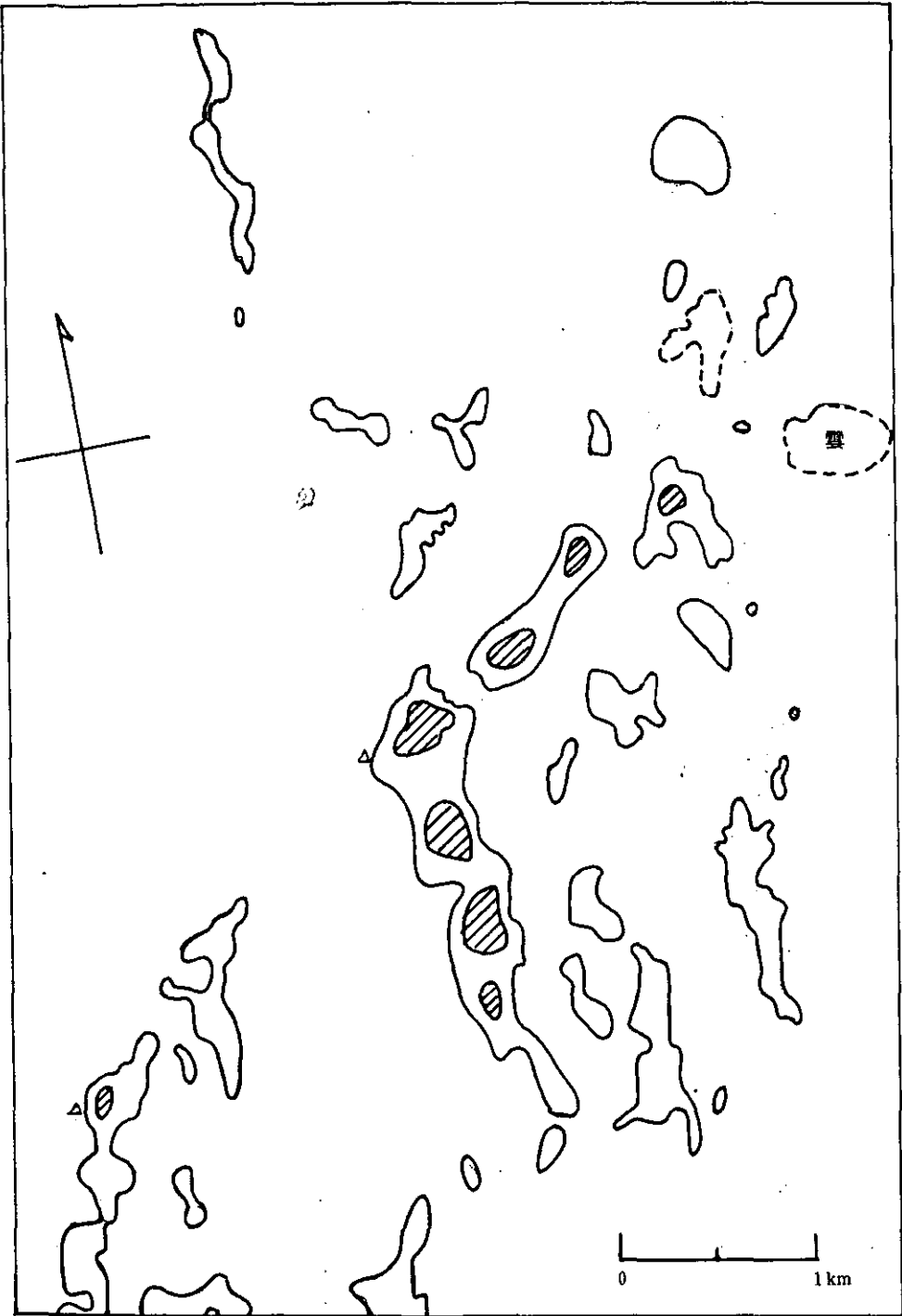


図30 月山における1980年6月12日の残雪分布の推定



図31 月山における1982年7月8日の残雪分布の推定(透明紙)と7月9日の空中写真による残雪分布図 (残雪分布図:五百沢,原図より)



4.4 ランドサット RBV による予備解析

ランドサットには今までに説明した MSS 以外に RBV (Return Beam Vidicon Camera) と呼ばれるセンサーシステムがある。現在は、システムの不具合等があるが 3号 (L3) において部分的に作動したものが使用できる。MSS が多重スペクトル放射計であるのと違って、RBV ではカメラの撮像管光電面に露光した後、いったんシャッターが閉じ、その間に電子ビームにより感光面を走査して、ビデオ信号に変換して地表面画像が得られる。2台の同型式カメラが搭載され、それぞれ 98 km×98 km の隣接した地表面を撮像するので、約 185 km 幅を連続走査する MSS のほぼ倍の解像度が得られる。すなわち、MSS の約 80 m に対し 40 m となるので、それだけ高解像度の地表面画像が作成できる。パンクロマチックカメラを用い、波長帯は 0.505~0.750 μm であるため、フィルムに出力した結果は、超高空からのモノクロ写真に近いものになる。

MSS と同じようにバルク補正ずみの CCT が使えるが、補正の過程で表現上の画素をほぼ 20 m 四方に相当するようにしてある。表 9 に示したように、入手できたデータ数が少なく、しかもセンサーシステムの不具合が MSS と交互に発生するというようなこともあって、MSS と RBV の同じ地表面物体に対する表現上の性能比較はできなかった。

高解像度に特色があるので、残雪面積が小さくなる夏から秋にかけてのデータ入手に努め、1981年 7月 31日と 9月 5日についての予備解析を実施した。

図 32 と図 33 が 7月 31日、図 34 と図 35 が 9月 5日のそれぞれのフィルムによる表示と、テストサイトについての CCT に基づく解析結果である。単波長帯であるため、MSS に対して適用した残雪の厚さのような質的解析は進めず、残雪の境界を表現することを目指した。0~127 の輝度レベルをスライスして、残雪境界値を定めたが、ここでは 88 がそれに相当した。出力はカラーディスプレイ上に表示し、得られたハードコピーから作成したのが、図 33 と図 35 である。残雪領域の表現精度を検証するために、図 36 に示すように、テストサイト周辺についての 9月 2日の斜め空中写真に基づく残雪分布図を作成した。7月 31日と 9月 5日の両日ともに雲が多かったため、鳥海山全域についての表現はできなかったが、7月のほうがテストサイトの大部分をカバーした形になっていて空中写真による分布図との対比がしやすい。

吹きだまり型の残雪は中央部が厚くなっているものが多いことを反映して、7月の解析図に現れた残雪領域のやや内側が空中写真による分布図とほぼ一致している。9月の解析図はすべて7月の内側にはいつている。残雪領域の検出には、解像度が MSS の倍になった分だけ精度が良くなったと言える。

この研究の主目標に雪田植物群落の検出がある。必ずしも単調でない山地の微妙な地形に関連して発現する雪田植生を、できるだけ小さな群落、少なくとも 1 ha 単位で検出できるためには解像度の良い衛星データが必要である。また、後述の残雪と雪田植生との関係において、実例を示すが、残雪の 7~9月における存在が重要であるため、衛星データの解析も 7~9月について実施できることが望ましい。MSS では 7月以降は大規模な雪田植物群落の検出に限定されるが、

RBV では 9 月 まで 可能性 の ある こと を 示 し て いる こと に な る。



図32 鳥海山周辺 RBV フィルム表示画像 (1981 年 7 月 31 日)



図33 1981年7月31日のRBVのCCTによる鳥海山テストサイトの残雪分布解析
(残雪境界を白で表示した。残雪の厚い部分は濃い黒で示されている。)



図34 鳥海山周辺 RBV フィルム表示画像(1981年9月5日)

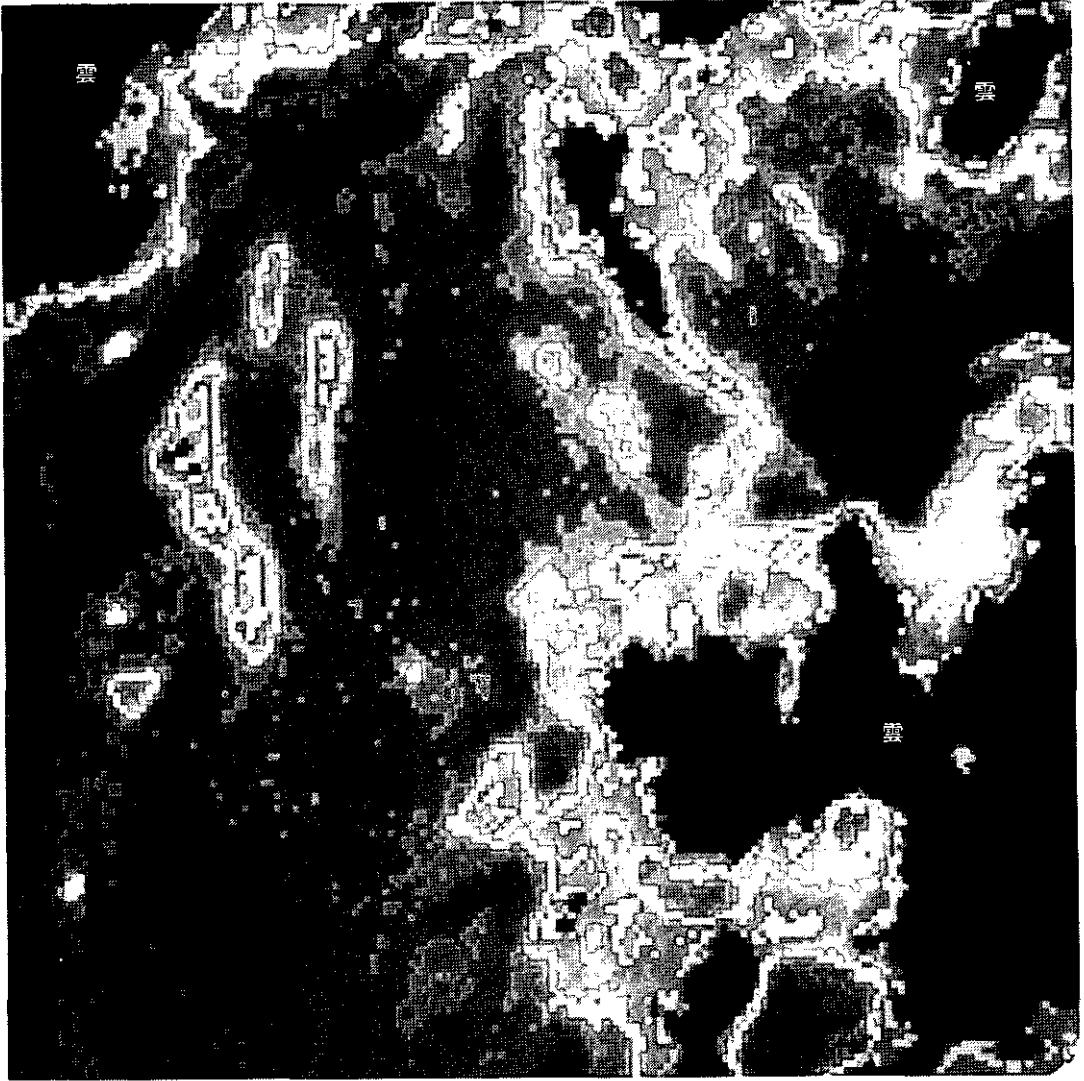


図 35 1981年の9月5日のRBVのCCTによる鳥海山テストサイトの残雪分布解析

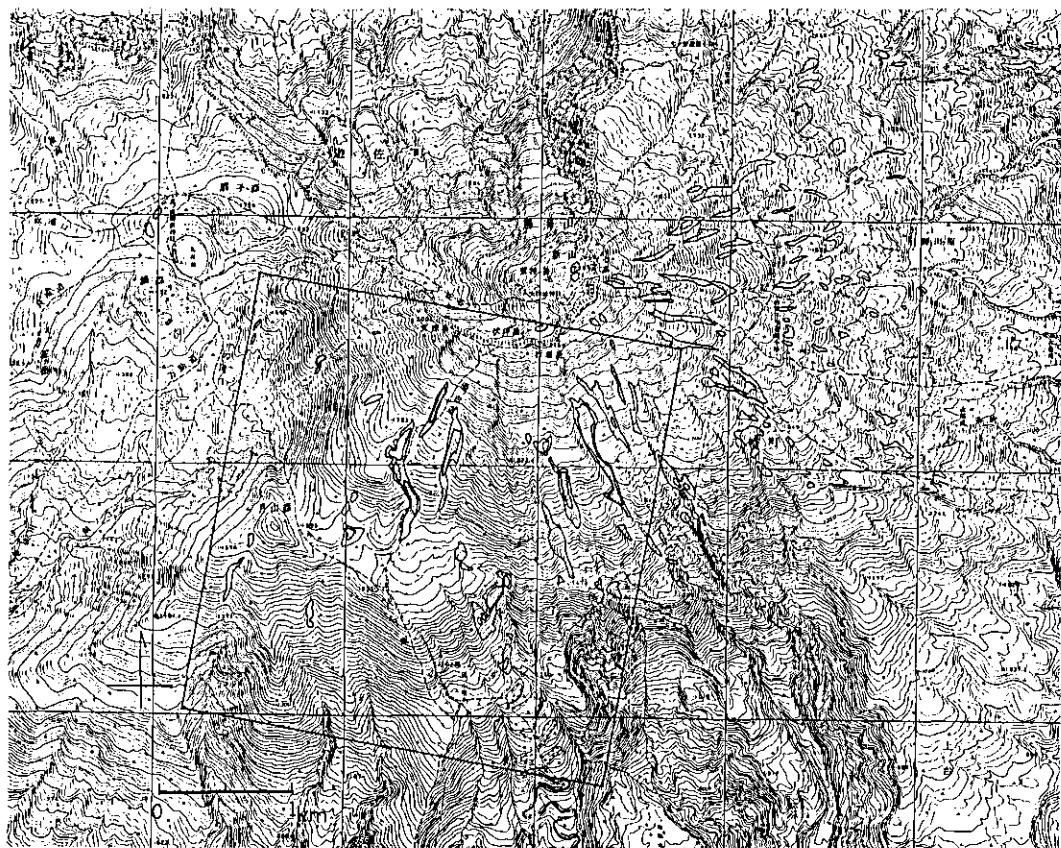


図 36 1981 年 9 月 2 日の空中写真に基づく島海山南～東斜面の残雪分布図
(枠内はテストサイト) (五百沢, 原図より)

4.5 ノア熱画像の補助的解析機能

ランドサット 3 号 (L3) には、熱赤外波長帯 ($10\mu\text{m}$ 前後) を利用するセンサーシステムがあったが、日本で受信が開始された 1979 年 1 月以降には既に性能が低下していた。筆者は 1979 年 3 月 1 日のデータについて検査する機会があったが、解析困難な状態であり、結果的にはそれ以後を含めて、バンド番号 8 の熱波長帯は公開されないことになった。

残雪を熱赤外波長帯で探査することには種々の利点がある。例えば、暖候期には残雪領域以外はかなり高温になるため、 0°C で区分した部分は、雲を除くとすべて残雪地帯として判別できる。また、残雪が雪田植物群落の生育環境に与える影響の中でも、最重要と考えられる温度の低下が残雪周辺のどの範囲まで及ぶかという問題にも資料を提供することになる。航空機搭載の熱赤外センサーによる残雪の探査も何回か実施している (土屋, 1976a, 1978b), その利点も上述のように認められるが、衛星データによる場合は解像度の関係で必ずしも明らかでなかった。L3 の熱赤

外データは解像度 240 m で、それまでに公開された気象衛星データに比べて数倍のものであり、利用効果が期待されていたが利用不能になったので、米国の気象衛星ノア (NOAA) シリーズの機能を検討した。

表 9 (p. 58) に示した入手データは、ノア 6号と 7号の AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) の CCT であるが、気象庁が受信処理して日本気象協会が公開提供しているものである。AVHRR の第 4 チャンネルは波長 10.5~11.5 μm のいわゆる大気窓領域であり、NE_eT (Noise Equivalent differential Temperature) は 300 K に対して 0.12 K となっている。衛星直下の分解能 1.1 km は、日本の気象衛星ひまわりの熱赤外チャンネルの 5 km より高く、現在、日本上空で作動して公開されているものの中では、定常的に入手できる高精度広域地表熱データである。

温度分解能が高いので、海面温度の解析に有用であるが、地表温度のように高温部と低温部の差が大きく面的一様性が欠ける場合には粗い解析しかできない。しかし、1日 2回日本上空を通過し、1回の通過で日本列島全域がカバーできるので、広域地表温度分布の概観に便利である。また、大都市のヒートアイランド現象の解析にも利用し得る程度の画解像度を示している。

大都市ヒートアイランド検出を目的にした簡単な単回帰式、

$$T_s = -0.14 T_c + 73.7 \quad (5)$$

を作成したが(土屋, 1982), これは 1981 年 4 月 23 日のノア 6号の AVHRR を利用するために、船舶気象通報の海水温をグランドトゥースにしたものである。ここで、 T_s は水面を含む地表の温度 ($^{\circ}\text{C}$) であり、 T_c は CCT 数値である。

(5) 式の適用範囲をどこまで広げられるかにはいくつかの問題はあるが、広域地表温度分布についての概観手段として用いることは可能と考えられる。図 37 は 1981 年 4 月 23 日 8 時の日本列島の中央部の地表温度分布をカラー区分で表示するために、(株)富士フィルムが開発した高品位カラーインクジェット複製システム (図 38) の後半を利用した原図を用いた。

衛星データ等の画像解析では、しばしばコンピュータ制御のカラーディスプレイとそれからのハードコピーシステムが利用されるが、カラー印画紙に関する写真光化学的制約によって、表現すべき色と違う色が出力されるため、カラー区分を多くすることができない。通常 12 段階ぐらいであるが、インクジェット方式は染料を用いて印刷する方式であるため、加色法による色彩表現は理論的に求めたものとほぼ同じになるので、倍の 24 階級又はそれ以上にしても、肉眼による識別が容易である。

低温部(白: -0.4 以下, うす浅黄: $-0.4 \sim +1.0$)に表示された所が、雲を除くと、残雪領域を示していることになる。4 月 23 日は、ランドサットが札幌から富士山に至る path 116 を通過しており、そのカラー合成画像によって残雪領域をやや詳細に判別できる。ノアの温度画像の低温部との一致はほぼ妥当と見られたので、いくつかの山地についての残雪の多少を比較することができ

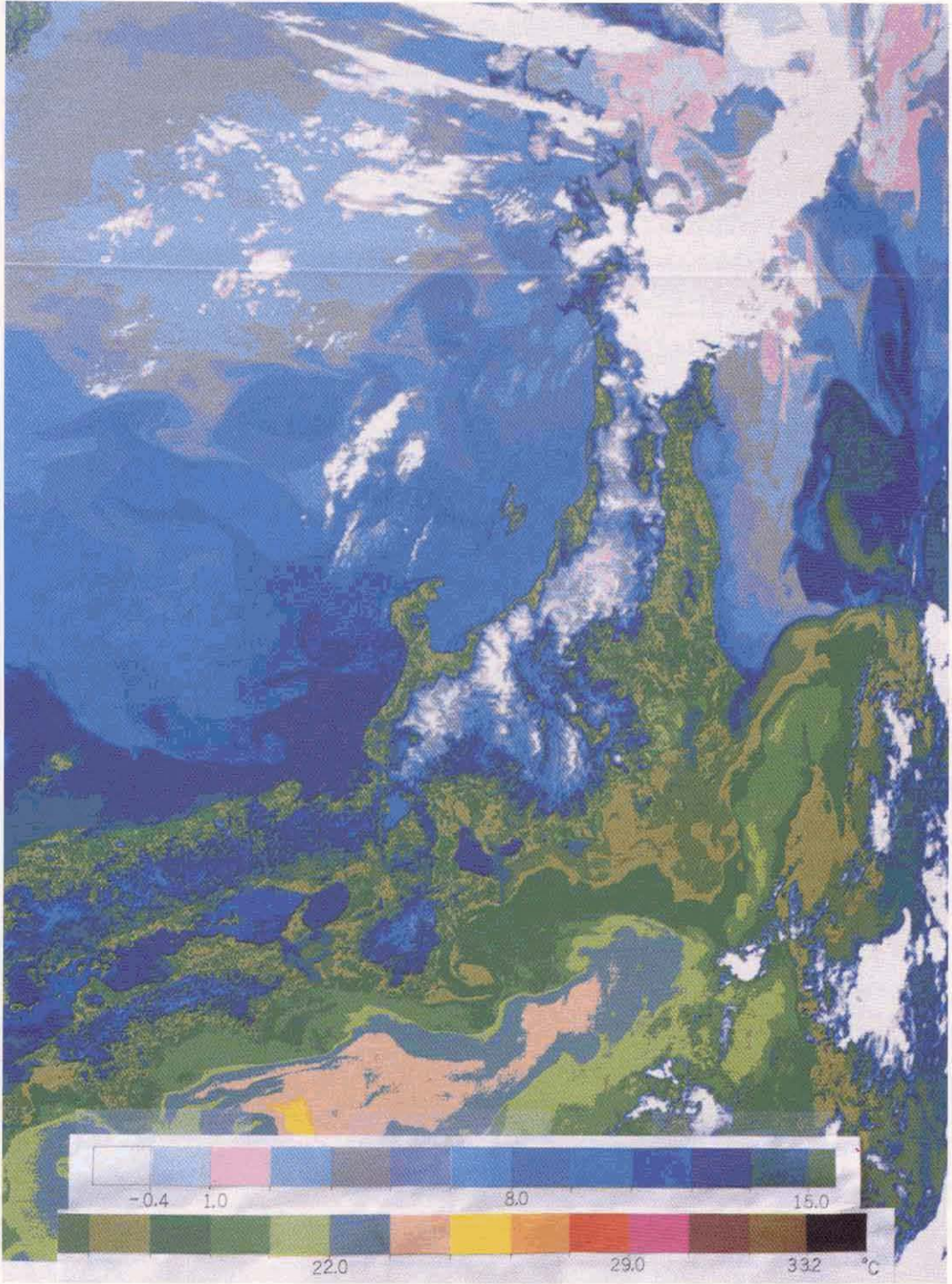


図37 ノア6号による熱画像 (1981年4月23日8時)

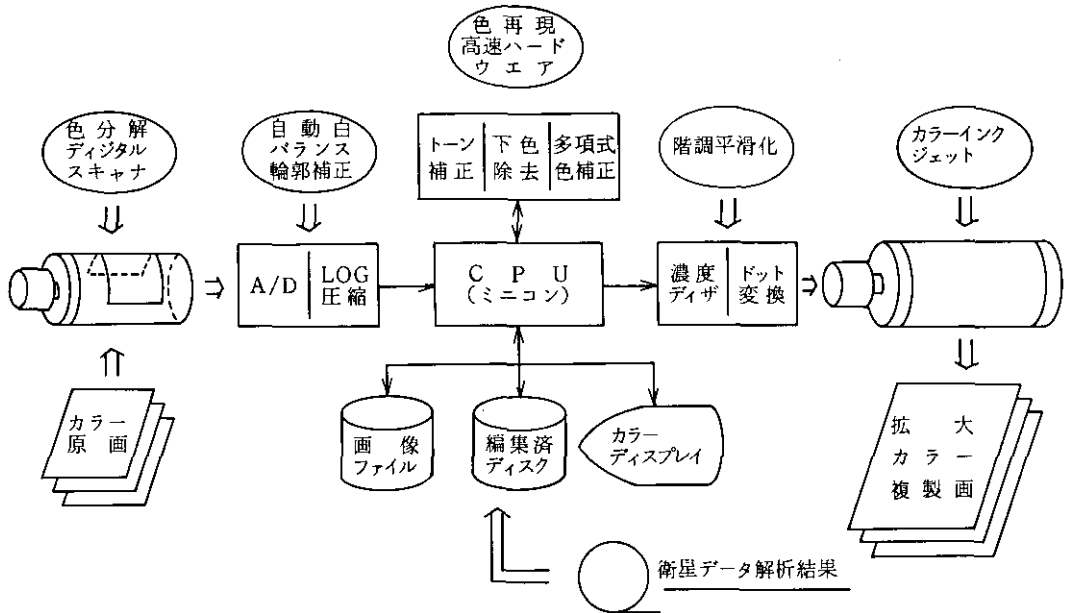


図38 高品位カラーインクジェット複製システム（このシステムの編集済みディスクの部分に、別のコンピュータで編集した画像ファイルを移して、カラー印刷画像にした。）

る。ランドサットは18日後に同一地点を通過し、走査範囲も185 km幅であるが、ノアは1日2回で走査幅は約2,000 kmである。したがって、東西に離れた山地の残雪の多少を比較するためには、ノアは特に有効な手段となる。図39は1982年5月15日のノア7号に基づく北海道南西部と東北北部の熱画像であるが、鳥海山(2,237 m)の残雪がその北の岩木山(1,625 m)や羊蹄山(1,893 m)よりはるかに多いことを示している。残雪の多いことは、雪田植生の発達を示唆するものである。したがって、前述のランドサットMSSあるいはRBVのように、個々の雪田植物群落の存在地を検出することはできないが、雪田植生地帯の多く見られる山地を全体として示唆することができるので、他の衛星を用いてより詳細な解析を進めるための判断材料にすることができる。この図では、地表の低温部(0°C前後)の表示に重点を置いて、カラーハードコピーシステムにより10階級のカラー区分をしたものを原図にしている。

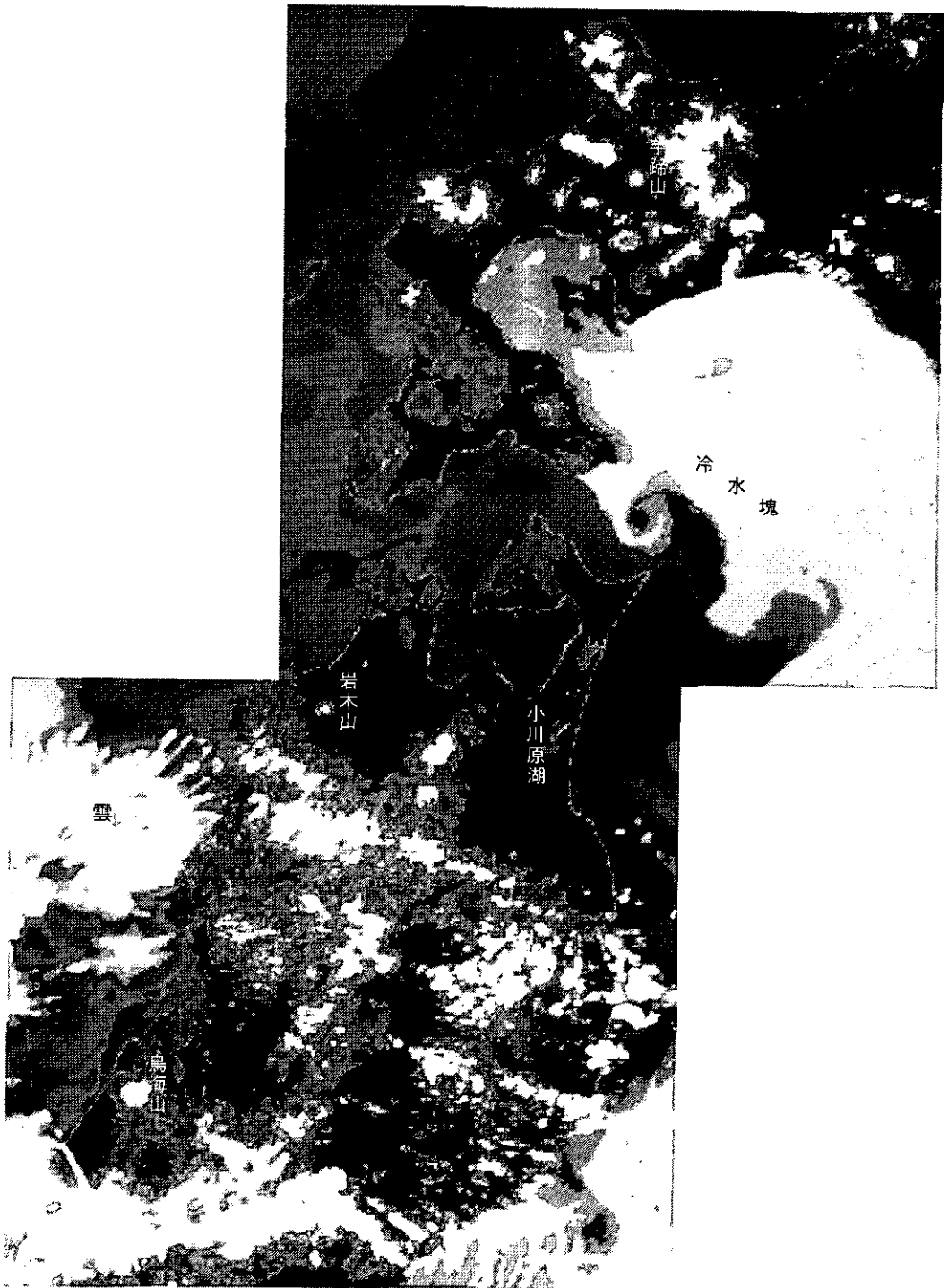


図39 1982年5月15日15時のノア7号に基づく熱画像(部分)

第5章 残雪と雪田植生

5.1 厚い残雪と植生

5.1.1 亜高山針葉樹林帯の欠落

第2章で、植生と大量積雪との関係を略述した(p. 18)。ここで、再び雪と植生に論を戻すのは、大量積雪の季節的推移の後に出現する厚い残雪について、衛星データによる解析の手法が第3章と第4章によって提示できたためである。冬の大量積雪そのものは、現在の衛星データ解析技術では数値解析が困難である。しかし、降雪の季節が終わり、残雪の季節の進行につれて、残雪の質と量に関する情報が得られることは、植生との関係を調べるのにむしろ都合が良い。

第2章でも説明した、日本海側多雪山地における亜高山針葉樹林帯の欠落現象について、四手井(1952)は「本邦裏日本は温暖、多雪と言う逆の気候の中にあり、夏の生育期には残雪多く、その為雪線が低下し、気温が低下するため、残雪地帯に存在すべき森林帯は欠如し、高山帯に移行することが認められる。」と表現した。この表現に関連して、「アオモリトマツ(オオシラビソ)林の生立すべき地帯が残雪による低温に起因し、高山帯に変化したと見るべきであろう。このような原因により生じた高山帯は真の意味の高山帯と区別されるべきならば『偽高山帯』とも称せられるべきであろう。」とも述べている。ここで提案された『偽高山帯』の名称は、その後の四手井(1956)の論文では使われていないのにもかかわらず、現在に至るまで東北地方の植物生態学者によって広く用いられている。四手井(1956)は、亜高山針葉樹林帯の欠如について、大量積雪の圧力を重視している。これには、月山における大量積雪を直接観測した体験が生かされたと言えるが、前報(四手井, 1952)では積雪の温度的役割重視が先行したことが理解できる。

残雪は降雪季節の積雪量を反映する。厚い残雪が大量積雪の結果であることは、いくつかの調査で明らかにされているが(例えば、土屋, 1976b)、残雪と植生の関係については、四手井(1952)以後積雪についての概観的な重要性は認めても(例えば、Midorikawa, 1959)、暖候期における残雪の役割についての十分な議論は行われていない。

ここでは、大量積雪に基づく厚い残雪のもたらす現象を、鳥海山のテストサイト周辺からいくつか抽出して、亜高山針葉樹林帯の欠落と、それに伴う高山景観としての雪田植生の出現を考察する。

図40は、テストサイトのグランドトールズ調査の対象にした雪田草原とその周辺の、1982年6月11日、7月25日、8月2日、9月23日の景観を撮影したものである。a～fの6枚の写真によって、高木性のブナなどの森林が、低木性のミヤマナラ、ミネカエデそして雪田草原へと残雪の厚さに応じて変化していく様子が見られる。この場所の海拔高度は1,150～1,200mであるが、高木



(a) 1982年6月11日



(d) 1982年8月2日



(b) 1982年7月25日



(e) 1982年8月2日



(c) 1982年7月25日



(f) 1982年9月23日

図40 雪田植生地帯の景観 (撮影 池田昭二)

性の針葉樹林は全く存在しない。ほぼ同じ気温で推移する蔵王の同高度では、アオモリトドマツの森林が形成されている。なお、蔵王の残雪量は鳥海山に比べてはるかに少ないが、雪田植生の分布もほとんど見られないか、ごくわずかであることが、環境庁の第2回「緑の国勢調査」に際して作成された植生図（環境庁，1981）によって認めることができる。

5.1.2 高山原生的景観としての雪田植生

第2章に植物生態学の分野でまとめた雪田植生の説明をしたが、ここでは残雪との関係を景観として見る立場で説明する。既に指摘したように(p. 24)，残雪あるいは積雪が、雪田植生の環境こう配を規定する重要な因子であるが、雪田植生地帯の残雪の推移との関係を調べた例は極めて少ない。さきに紹介した(p. 22)飯豊山の場合は(山中，1979)そのわずかな例であった。

鳥海山のテストサイト周辺では、数年間にわたり、毎年数回の現状撮影をした。図40と41によって、残雪の実態に応じた景観の違いを認めることができる。

図40に示した雪田草原では、残雪は年によって変動はあるが、平均して8月初旬に消失する。それからほぼ1か月の間にイワイチョウやヒナザクラなどが芽を伸ばし開花して、図のfに示したような草原のお花畑を形成し、9月下旬には外側から紅葉が始まる。イワイチョウの紅葉はイチョウの紅葉に良く似た美しい黄色になる。

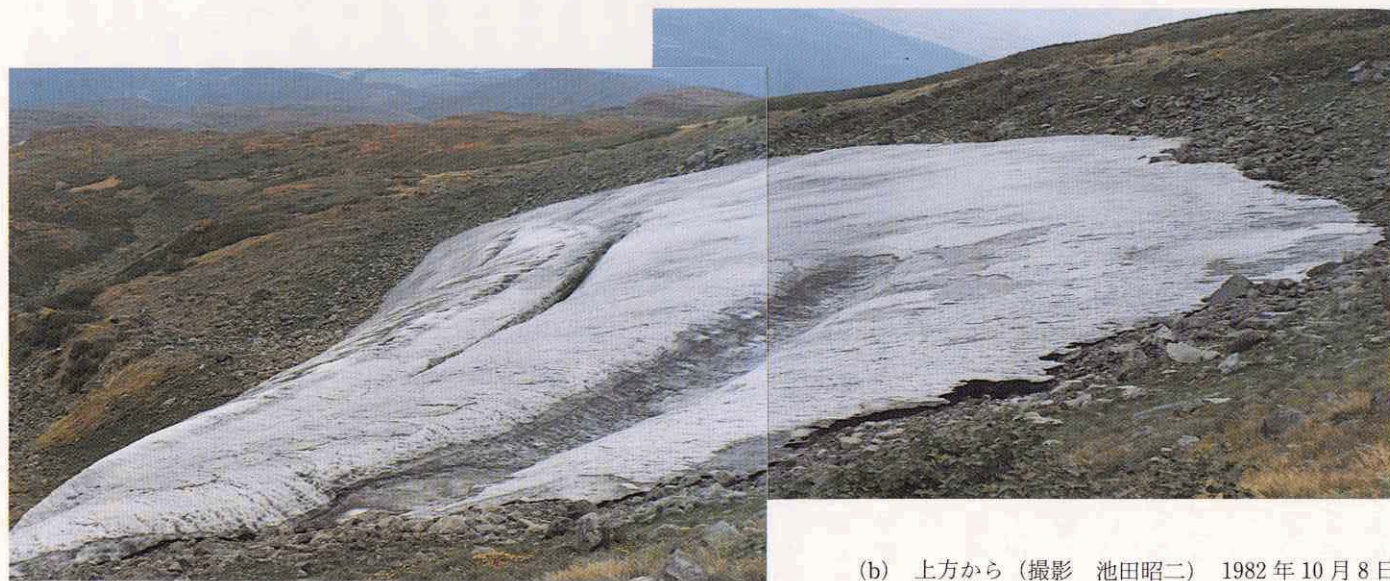
残雪量が増加すると、融雪の遅れる中央部の植物生育可能期間が減少し、ある時期を過ぎると、お花畑を構成するような種類は見られなくなる。蘚苔類がわずかに散在し、それも見られなくなって、大小の岩塊が存在する凹地が現れる。凹地帯の残雪の消失する時期が8月～9月の何時であるか明白ではないが、テストサイトの知見では、ほぼ8月中旬以後であった。

図41 aは図40の場所から北に向かった所で、近景の雪田草原は海拔高度1,250～1,300 mであって、残雪は消失直前である。周辺には植生のほとんど見られない岩塊があり、その外側にイワイチョウやチングルマなどの雪田草原、さらにその外側にミネカエデ、ミヤマナラ、チシマザサなどの低木林が広がっている。そして遠景の残雪は、高度1,350 m～1,450 mにあって、その外側に同じような岩塊—雪田草原—低木林が広がり、りょう線にはハイマツやハクサンシャクナゲが見られる。遠景の残雪は、年によって最深積雪が45 mを越し、20 m近い厚さで越年して小規模な氷河現象を示す(土屋，1976 b, 1977 b, 1978 ab)。図41 bは雪田草原から低木林に移行するりょう線近くからの撮影である。このとき(1982年10月8日)の厚さは中心部で約10 mであり、2年氷の露出やクレバスの形成など、氷河現象の進んでいることを示している。

図40と41の位置関係は、図42の地図及び図43の空中写真によって理解できるが、鳥海山の南斜面の南北に伸びるりょう線の東側に、少しずつ高度を上げるごとに、残雪の量に応じて、景観の異なっていく様子が認められる。ここに示した残雪は、すべて冬の季節風に対して、りょう線の風下側斜面に形成されたものであって、なだれを含まず、年による厚さの違いはあっても、毎年同じ場所に発生する。したがって、融雪によって地表の現れる平均日数が植生の生育可能日

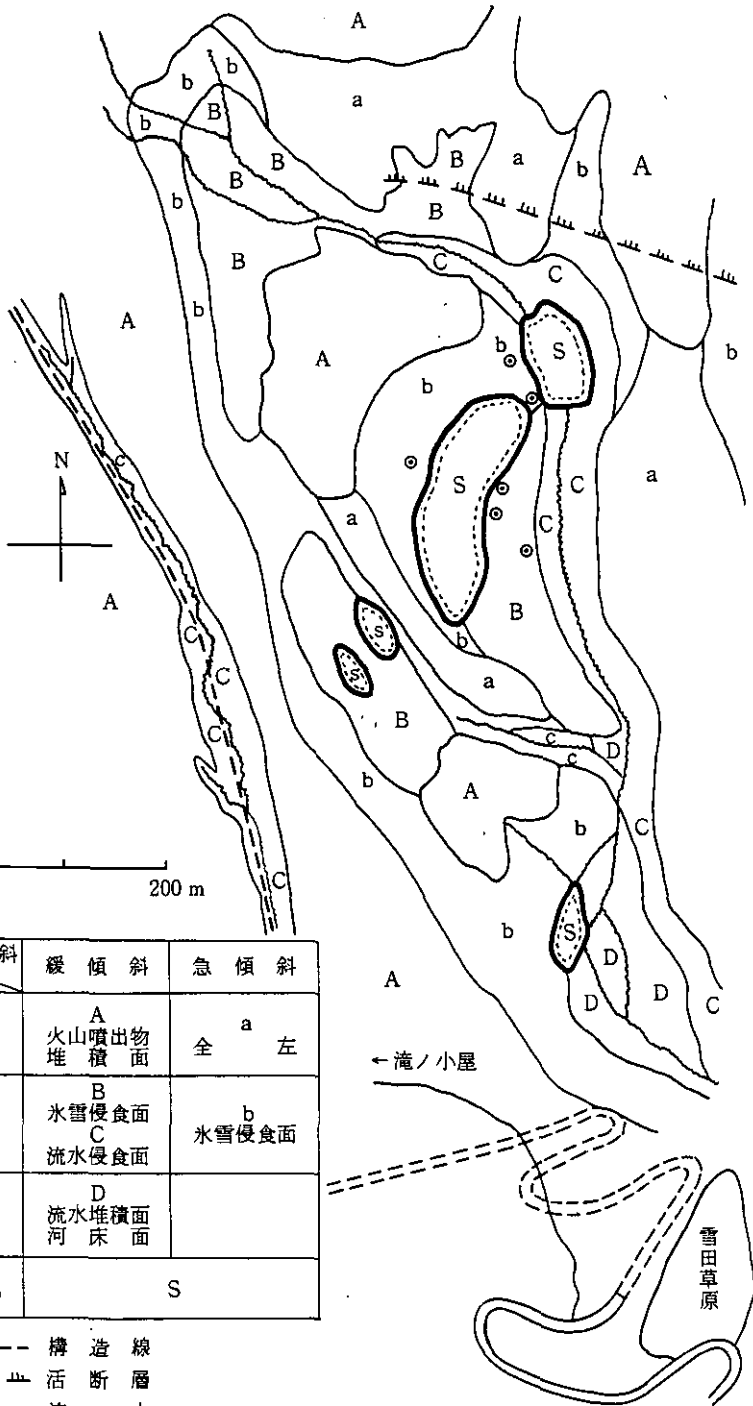


(a) 下方から 1982年9月23日



(b) 上方から (撮影 池田昭二) 1982年10月8日

図41 中心部に残雪の残る雪田植生地帯



斜面型 \ 傾斜	緩傾斜	急傾斜
凸型斜面	A 火山噴出物 堆積面	全 a 左
凹型斜面	B 水雪侵食面 C 流水侵食面	b 水雪侵食面
複合斜面	D 流水堆積面 河床面	
残雪・氷塊	S	

- 構造線
- ▲▲▲▲▲ 活断層
- ~~~~~ 流水
- ◎ 基準点

図42 雪田植生地帯の地形分類 (五百沢, 原図より)



図 43 雪田植生地帯のカラー空中写真
(1976年10月23日, C TO-76-11 C5B-7)

数となって、その生育可能日数に適合した種類が育つことになる。低温の雪に長期間覆われて、わずか1~2か月の生育可能期間も冷い雪解け水に浸される。そのため、しばしば湿性のお花畑と呼ばれ、夏を過ぎての氷雪塊と隣接する景観は高山の原生的自然の一つとして認められることも多い。

鳥海山の場合、これら残雪群と同じ高度で谷を隔てたりょう線の風上斜面には、同じかあるいはそれより高い場所に、ミヤマナラやダケカンバが森林を構成し、10 m以上の高木も多数見られる。森林だけを見れば亜高山帯下部であり、雪田草原や小規模な氷河(国際分類では niche glacier に相当する)に注目すれば高山的景観である。しかし、海拔高度はわずか1,200 mから1,400 mの場所であって、緯度が約40度であることを考慮すると亜高山でも高すぎる表現とさえ感じられる。海岸に暖帯林の指標種とされるタブノキが育つ場所からわずか10 kmの内陸山地へ、高さにして1,000 m少々登るだけで、亜高山帯から高山帯の植生景観が見られるのは、恐らく世界にも例がないものと思われる。このような景観が発生し維持される要因の第1は、大量の積雪であり、それに基づく厚い残雪であると言える。

5.2 残雪分布図と植生図

さきに、1979年5月22日のランドサットMSSのCCTを用いて、鳥海山の残雪深度階級区分図を作成した結果を図24(巻末)に示したが、その残雪分布図を地図上に加刷すなわちオーバーレイする作業を進めているとき、鳥海山地区の詳細な植生図作成作業が進められていた。もし、MSSの解析によって作成した残雪の深度階級区分図が妥当なものであるならば、夏遅くまで残る残雪、すなわち厚い残雪の領域は雪田植生地帯と一致するはずである。したがって、図24は雪田植生地帯を検出している可能性が考えられる。そこで、植生図の完成をまって、植生図と残雪分布図を比較した。

図44は植生図(環境庁, 1981)からテストサイト地域の雪田植物群落を抽出した図と、図24と同じ手法で作図した図28の残雪深度階級区分図とから、同じ地域の残雪分布図に編集したものを示している。残雪分布図は1981年6月16日の状態であって、必ずしも平年的なものではないが、厚い残雪の部分の位置は、吹きだまり型残雪の一般的性質によって、ほぼ毎年同じであると言える。他方、植生図は部分的な現地調査の知見をカラー空中写真を媒体にして拡張表現しているもので、主観的表現に基づく部分も多い。したがって、両者の厳密な照合は困難であるが、方眼紙による簡単な計算では検出率は80%強になった。したがってランドサットMSSによって示した残雪分布図が雪田植生地帯をかなり良く検出しているとみなせる。

このことは、ここで照合した植生図の5年前の、主として地上調査に頼った植生図と比較することによって説明できる。図45はその植生図(山形県, 1976)からテストサイト周辺の雪田植生地帯を抽出したものである。少なくとも、残雪分布図はこの図よりもはるかに詳細で精度の良い雪田植生地帯の指標になり得ることを示していると言える。

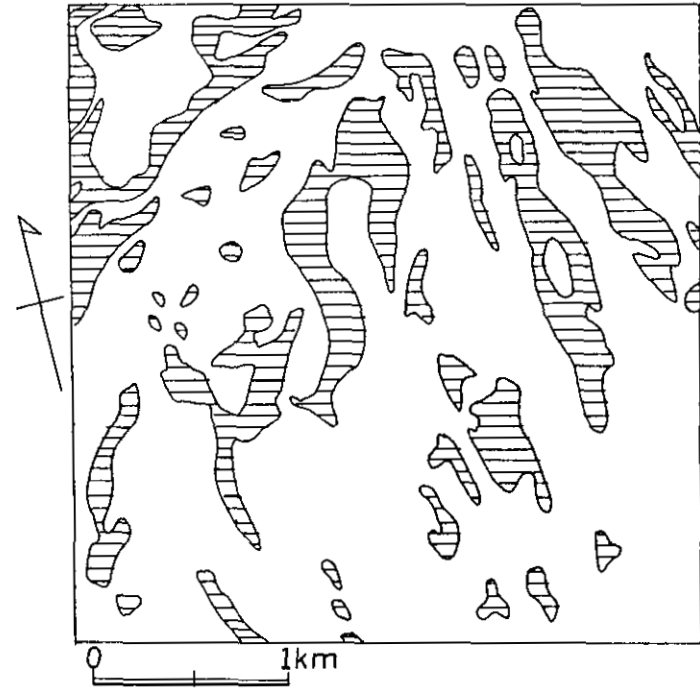
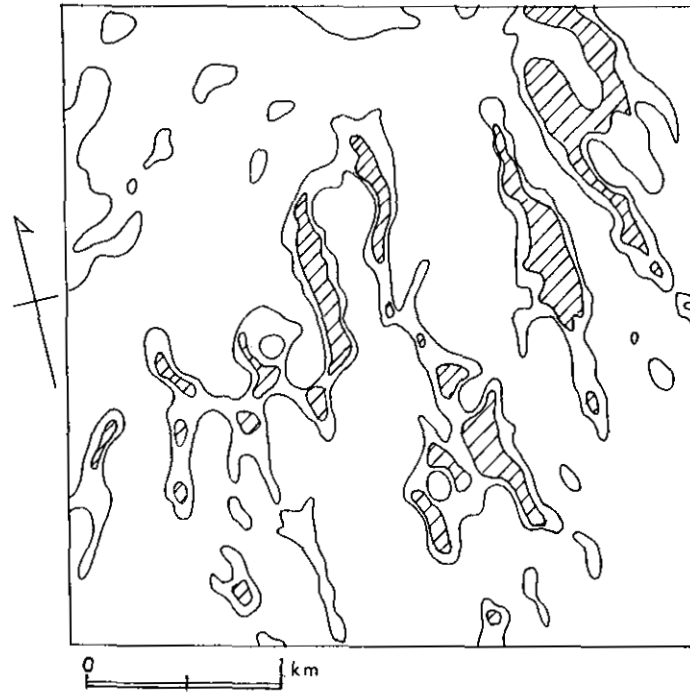


図44 衛星データに基づく残雪分布図(左：1981年6月16日)
と雪田植物群落分布図(右)

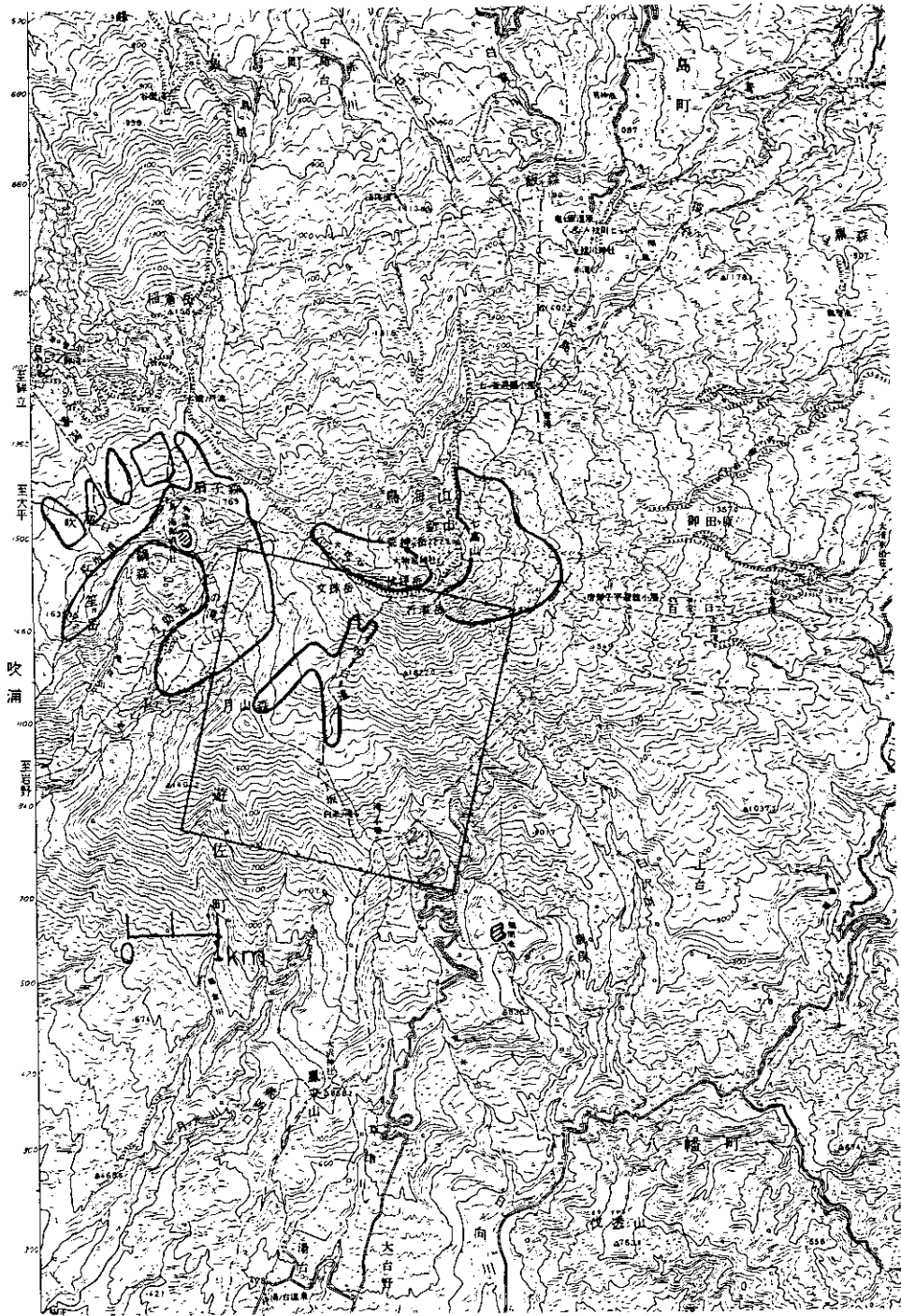


図45 テストサイト周辺の雪田植生 (山形県, 1976より抽出)

ここでの残雪分布図に 1979 年 5 月 22 日のものを使わなかったのは、1979 年が少雪年であり、1981 年のほうが平年状態に近いためであって 1979 年の場合も基本的には同じように一致していた。

残雪分布図は地形図に重ねることで、残雪からの融雪水が流出しやすいか、停滞しやすいかわかる。流出しやすい場所は、残雪が消失すると乾燥しやすいので、アオノツガザクラやイワノガリヤスなどの乾燥型群落が多くなる。融雪水の停滞しやすいなだらかな斜面では、ヌマガヤーイワイチョウ群落が多くなり、さらに湿原に近づくとエゾホソイ群落が目立ってくる。月山には鳥海山よりもなだらかな斜面上に残雪の存在することが多いため湿原状をなす場合が多く、弥陀ヶ原湿原はその例である。石塚ら (1975) によると、典型的な高層湿原とは異なって泥炭層が薄く、山地貧栄養湿原の生成初期の状態であるという。

現在、植物生態学者の間でも、雪田植生と高層湿原植生との間の区分は人によってまちまちであり、いまだ確定していない。残雪の量的表示の技術は地形図上にオーバーレイできることによって、この分野の研究を進展させる材料になることが考えられる。

月山については、まだ詳細な植生図が作成されていないが、図 30 (p. 69) に示した 1980 年 6 月 12 日の残雪分布図は、石塚ら (1975) の説明した主要雪田植生地帯を示した形になっている。また図 31 (p. 70) の 1982 年 7 月 8 日の例でも、大規模な雪田植生地帯と一致している。しかし、やや季節が進行しているため、弥陀ヶ原湿原などでは、表示された残雪領域が小さめになっている例もある。

今までの、残雪分布図と植生図等の照合では、6 月中旬前後の残雪分布図が適しているようである。このことは、7 月以降について、より高い精度で残雪領域を検出している RBV の解析結果を示した図 33 (p. 73) と比較することによって認められる。図に示された残雪領域は 6 月のものに比べて、全体として縮小しており、特に小規模のものはいくつか消失している。そのため、大規模な雪田植物群落との対応は良いが、小規模のもの検出機能は低下することになる。なお、7 月以降特に 9~10 月については、雪田植生地帯の中心部が無植物あるいは植生のごく貧弱な岩石荒原状の景観になるが、越年性の残雪すなわち万年雪や小規模なニッチ氷河 (niche glacier) を中心部に持つ雪田植物地帯も示すことができる。

高山又は亜高山地帯の残雪分布図が、雪田植生地帯検出の役割を示すことは、同時に残雪のない部分や少ない部分について、他の植生地帯の存在を示唆することになる。鳥海山のテストサイトでは、高度の高い (ほぼ 1,500 m 以上) りょう線風上斜面に、高山ハイデあるいは風衝草原が存在する。風下や谷でも残雪がそれほど多くなければ、高山低木林や亜高山帯自然植生の指標となるダケカンバやミヤマハンノキの群落が広がっている。

なお、植生図 (環境庁, 1981) によると、鳥海山の北斜面より南斜面のほうが、高山帯自然植生とされるものの分布域が広く、しかもそれが低い高度にまで下がっている。図 24 (巻末) に示した残雪深度階級区分図は、5 万分の 1 地図にオーバーレイ仕様で表現しており、植生図と同じ縮尺

である。さらに残雪の最小単位は $57\text{ m} \times 57\text{ m}$ であり、 1 ha 程度を最小単位にした植生図に示された複雑な植物群落の分布図と対比しやすくなっている。したがって、従来の技術では知ることのできなかつた、山地全体の積雪、特に残雪についての領域と深さについての情報が、植生の分布を考察するために適した精度で、ほぼ毎年得られることが示されたと言える。航空機を使用する方法は、精度的にはさらに高いが、山地全体については多額の経費と長い日数が必要になるし、毎年の作業はさらに実現が困難である。衛星データの利用は、限定された作成機会によって用意される空中写真やそれに基づく解析結果を広い範囲に拡張したり、時間的空白期間を埋めたりする手法にもなり、また他の山地を含めた広い地域の同時データの解析が可能という、航空機データにはない特色が強調できる。

第6章 まとめ

6.1 残雪情報の意義

第2章で感覚的に表現されていた日本海沿岸の多雪山地の内容を検討し、通常の手作業による直接測定では知ることのできない、5~10 m以上の最深積雪になる地帯に、特色のある原生的自然植生の雪田植物群落が多く見られることを示した。そして、雪田植物群落の典型的に見られる、八甲田山、鳥海山、月山、及び飯豊山についてのいくつかの調査報告に基づいて、降雪季節の終わる晩春から秋にかけての積雪の推移と雪田植生地帯の景観の推移を検討した。その結果、雪田植物群落の生育環境を構成するいわゆる環境こう配の中で、最も重要な積雪についての知見が、従来極めて得難かった事情が明らかになった。

しかし、第1章にも説明したように、空中写真測量に始まり、衛星リモートセンシングの分野で技術開発の進み出した、衛星水文学の技法によって、雪田植物群落の積雪に関する知見の得られる可能性が出てきた。

筆者は、ランドサット等の各種衛星のリモートセンシング利用技術を開発する過程で、大量積雪の後の残雪の経過状態を探查することによって、降雪の季節には解析不能と見られていた深雪を、残雪に関するいくつかのモデルによって数的に指標化できることを示した(土屋, 1981)。

山地の積雪季節の終わり頃の最深積雪の状態については、従来から水資源の立場で精度の高い情報の必要性は良く認識されていた。いわば積雪情報であるが、第3章に論じたように、種々の利用分野が考えられる。例えば、積雪深分布図は、水資源、なだれ災害、スキー場適地、冬山登山、山岳道路適地、造林適地などの分野に必要な情報を提供するとともに、この報告で主題とした山地自然保全の分野でも活用できる。山地自然保全の中には、上述の雪田植生の生育環境の実態把握が含まれるからである。

第3章で説明したように、現在の衛星リモートセンシングの技術では、降雪季節又は春先の冬山の状態では、積雪深については50 cm以上の深度を階級区分することはできない。しかし、季節をずらした、残雪の季節5~9月については、第3章と第4章で説明したように、一種の指標化技法によって10 m前後以上の厚い残雪の区分が可能となった。残雪についての知見すなわち残雪情報をいくつかの分野で活用するための、衛星リモートセンシングあるいは衛星水文学における重要技術として利用できるものと考えられる。

さらに流出解析を含む水資源の分野でも積雪情報の場合の積雪深分布図と同じような利用を考えることができるが、この場合はいくつかの山群を同時に扱うという衛星の広域同時性を有効に利用できる。そして、山岳道路、造林等の開発関連事業に伴う山地自然保全上の必要情報として

の役割も大きくなる。

残雪分布図など本研究で開発した技法を用いることにより、

- 1) 自然度 10 の雪田植生地帯を、残雪を検出することによって表示し、
- 2) 空中写真や地形図と組み合わせて雪田植生の型の区分の参考資料となり、
- 3) 雪田植生地帯の中から、季節的に弱くなる部分など、保全上注意すべき問題の指摘に用いることができ、

4) 雪田植生が典型的に発達する山地斜面に関して、気候地形としての残雪凹地における地形推移の中での、残雪と植生の相互作用についての知見が得られる。

さらに、

- 5) 年々の残雪推移を見ることで、残雪の年々変動と雪田植生との関係が究明できる。

これは、雪田植生の種々の型や種類が、残雪の平均状態かあるいは極大又は極小のどれを反映しているか等、まだほとんど知られていないことへの、新しい観点を追加することになる。

特に、はじめにあげた雪田植生地帯の検出は、「第1回緑の国勢調査」報告書における、自然度 10 と 9 について「自然環境保全の面から先取的に確保されねばならない地域である。」との指摘（環境庁、1976）に対応できる技術の一つであるといえる。

「第2回緑の国勢調査」で作成された植生図はほぼ 1 ha 前後を最小単位としており、ランドサット MSS の解像度 80 m にほぼ見合っているので、図 44 (p. 88) に示したように、衛星データによる雪田植生地帯の検出は可能である。また、マクロ的表現になるが、図 37 (p. 78) に示した解像度 1.1 km のノアの熱映像に示された中部地方の残雪地帯は図 46 の自然度 10 と 9 の領域とほぼ一致することがわかる。図 46 は「第1回緑の国勢調査」の際に作成されたほぼ 1 km メッシュの自然度ファイルから、コンピュータの編集作業によって、カラーコードに合わせてフィルム上に直接露光をしたものである。この技法によって 3000×3000 画素の一画面表示を可能にし、日本全国を自然度ファイルのメッシュ構造のまま色のひずみなしに 10 と 9 を区分できた。



図46 第1回緑の国勢調査による自然度メッシュコードのCCTに基づくカラーコード区分

6.2 残雪と原生的自然の保全

山地残雪と自然保全との関係は、これから認識の始まる新しい問題でもある。最深積雪が10 m以上、年により場所により時には40 mを越す現象があるということ、さらにその積雪が残雪となった後についての知見が、専門の雪氷科学関係者の間である程度理解されるようになったのは、1970年代になってからである。四手井(1952)によって、多雪山地における亜高山針葉樹林帯欠落に関しての仮説が提案されてからほぼ20年が経過している。

1950年代の後半、月山で10 m弱の積雪断面掘削が実施されてから(山形県, 1956), 少しずつ多雪山地の多雪と残雪の問題が究明されるようになり、筆者の空中写真測量の広域実施によって、40 mを越す山地の大量積雪現象がいくつもの山群で発生することが明らかになった(土屋, 1976)。その間に月山の積雪調査は植物生態の立場からも関心が持たれ、四手井(1956)の積雪圧力の重視論その他が展開された。1960年代以後山地の観光開発に伴う、自然植生の破壊が目立つようになると、植物生態学分野からの調査も進行して、鳥海山や月山について実態がかなり判明してきた(石塚ら, 1972, 1975)。しかし、雪田植生に関しては、結城(1974), 土屋(1977 a)及び山中(1979)の観察報告以外には残雪との関係は特には注目されなかった。

前述のように、残雪情報の量的内容がこの20年の間にかかなり進歩したことを考えると、原生的

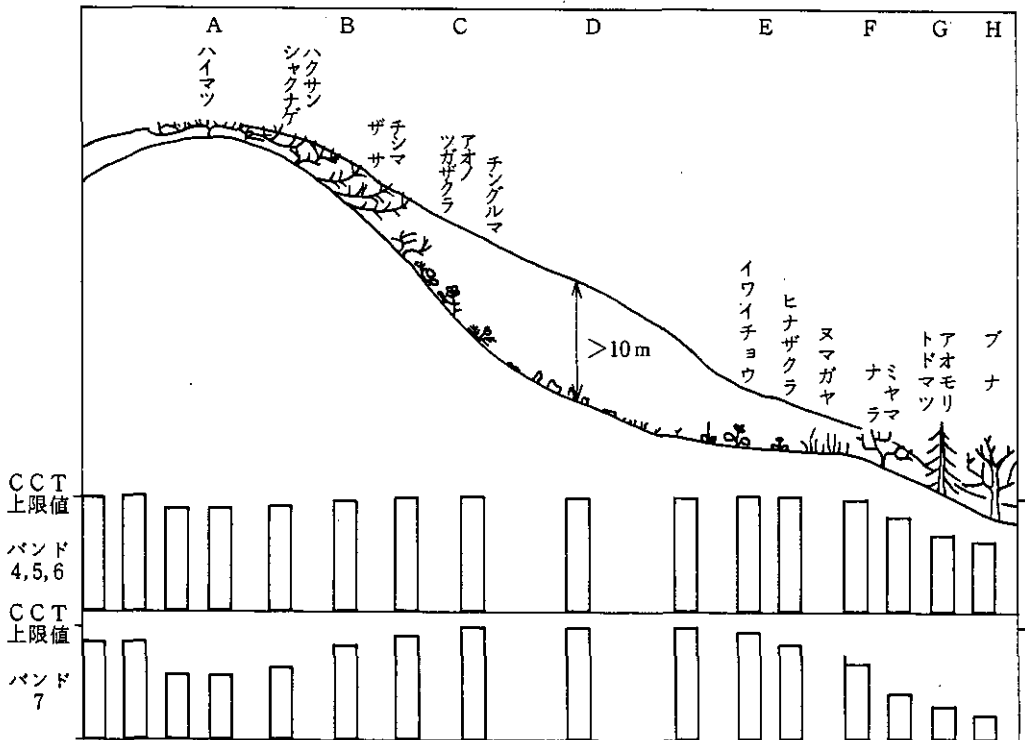


図47 残雪地帯とランドサット MSS 数値の相対的表示

自然の典型とされ、保全上の観点からは尾瀬に代表される高層湿原よりも人為的圧力に弱いとさえ表現された(石塚ら, 1972) 雪田草原を保全するためには、残雪と雪田植生との関係により一層の注意を払う必要がある。

積雪と雪田植生地帯との関係を模式的に示したのが、図 47 である。ここに示した最深積雪がさらに増大すると、斜面下方のブナはねじれたりして低木化し(H)、アオモリトドマツに代表される常緑針葉樹は生育できなくなる(G)。そして、ミヤマナラなどの低木林(F)も育ち難い深雪地帯では種々の雪田植物群落が見られるようになる(E)。深雪地帯の中心部では積雪が十分に深く、夏を過ぎても残雪が見られるようになると岩塊の荒原が展開する。そのために残雪荒原(snow desert)と呼ばれることもある(D)。そして、その上方で再び雪田植生が見られるが(C)、水はけが良いので乾燥型になり、次いで尾根筋のハイマツ帯に移る(A, B)。

ハイマツ帯より少し下の部分は、すべて厳冬期には厚い雪の下にあるため、その断熱効果によって植物は凍害を受けないが、暖候期に日光を見る期間は非常に短くなる。従来登山道は、雪の早く消える尾根を通ることが多かったので、雪田植物群落の育つような偽高山帯とも呼ばれる深雪地帯を通過する機会が少なく、原生的自然が保存されやすかった。

図 48 はそのような原生的自然の場へ山岳観光道路が侵入した状態を示したものである。この道路工事そのものは良心的なものであり、残土が道路外に積まれることもなく、また排水に積石を考えるなど、さまざまな注意が払われている。道路ができることは、既に図 40 (p. 82) にも示したように、大量の入山者を招くことにもなる。しかし、同時に今まで調査が困難であった原生的自然を、専門の研究者が現地調査しやすくなるときでもある。ここに示した草原地帯には、幸いにして道路工事のなされるときには永久方形区が設定され、経年的変化が調査可能になった。

図 49 は、雪田植生地帯の一部で筆者が見いだしたミヤマリンドウの白花のものである。ミヤマリンドウそのものは雪田草原に多いものであるが、青紫の花が普通で白花は極めてまれであり、和名シロバナミヤマリンドウ(学名 *Gentiana nipponica* Maxim. form. *leucantha* (Takeda) Hara) の名が与えられており、中部地方以北の高山でごくまれに見いだされることがあるという(前山形県立博物館業務課長吉野智雄氏の説明)。雪田植物群落の中には、学術的に貴重な種が見いだされる機会のあることを示した例である。

図 24 をはじめ、図 27 や図 28 などの衛星データに基づく残雪情報により、この雪田植生地帯の積雪が、図 48 の右端、ブナ林が低木化する所から急に増大し、雪田植生地帯がハイマツ帯に変わる所で、再び少なくなることが示されている。

結果的には、道路は弱い植生の存在する雪田植生地帯の破壊を最小限にする形で造成されているが、豊富な残雪を利用するスキー等の影響にはさらに特別な注意が必要である。



図48 大量積雪による樹木限界地帯（偽高山帯ともいわれる）の道路工事（1980年9月22日）



図49 雪田植物群落の中から
（希産のシロバナミヤマリンドウ、左に母種のミヤマリンドウが見られる。）（1983年8月27日）

6.3 展 望

多雪山地であり、残雪の厚いことによって保全されてきた原生的自然に、大量輸送手である道路建設が進むなど人間の影響が及ぼうとしている。この時期に、開発中の衛星リモートセンシングによる残雪情報を自然保全のための基礎資料にする可能性を明らかにするため本研究を進めてきた。したがって、技術的にもまた原理的にも十分な検討が済んでいない部分があっても、ある程度の実用性が認められるものについては活用を検討するという立場をとった。

衛星データの特色は、広域同時性であり、データは公開されているものが多い。処理方法については、現在、まだ大型電算機等の大きな施設を必要とする部分もあるが、次第に小型化された装置で処理が可能になってきている。近いうちに、パソコンで今までに述べたような残雪情報を山ごとに処理できるはずである。衛星データの磁気テープ(MT)から必要部分のみをパソコン用のフロッピーディスクで配布するサービスも実用化されようとしている。

したがって、残雪情報に限定しても、まず衛星データのフィルム画像で解析目標に適したデータを指定した上で、詳細解析のためのMTの一部分だけを利用し、結果をカラー空中写真(これも国土地理院から公開されている)や地形図と照合し、さらに問題になる地帯の現地調査をするという作業計画が進めやすくなる。

ここでは、残雪情報による雪田植生地帯の検出に重点を置いて、自然保全のための情報としての価値を論じてきた。この検出技術は、保全対象の事前調査のために有効であるが、植生をめぐる環境こう配についての情報も得られるので、生育環境の保全という分野についても利用できるはずである。また、広い山地の中から、対象にした植生地帯の典型的な事例を検出する手段の一部にもなり得るので、今まであまり究明されていなかった、生育環境の典型についての詳細な調査の目標も立てやすくなる。そして、雪田植生以外の植生に対しての残雪情報の役割も今後の検討に十分価するものと思われる。

なお、衛星のセンサーについても解像度を上げることが進められており、また、使用波長帯の種類も増えつつあるので、残雪情報の内容を豊富にし精度も良くなることが期待できる。また受信後の処理過程の改善も進んでいることが、上記展望をより確かなものに行っていると言える。

謝 辞

経常研究のテーマとして開始したのは1978年であるが、1976年に終了した「リモートセンシング情報利用技術の開発に関する総合研究」(科学技術庁特調費)に参加して得た成果を、さらに発展させた部分が多いだけに1977年以前から続いて各方面の方々から多くの御協力を得たことに感謝したい。

1978年以後に限っても、定点写真の場所へ毎年何回も足を運ばれた酒田測候所の谷地森隆氏、高田行光氏及び荻野幸雄氏、現地調査に同行していただき、地形調査や空中写真による残雪分布図作成を担当していただいた五百沢智也氏、植生調査をしていただいた吉野智雄氏、小笠原俊彦

氏、及び土壤調査をしていただいた安藤務氏、テストサイト周辺の写真や残雪調査を分担していただいた池田昭二氏の御協力があった。さらに、山形大学の石塚和雄教授には雪田植物に関するいくつかの論文をいただき、詳細な内容引用をさせていただいた。また、高山蝶ベニヒカゲに関するいくつかの問題点を渡部孝雄氏に教えていただいた。

調査計画については、環境庁自然保護局の方々に相談に応じていただき、山形県自然保護課、八幡町役場の方々には御理解と種々の便宜をいただいた。なお、毎年の調査に関連しての申請書類では酒田営林署の担当係の方のお世話になった。

解析作業等では、日本気象協会、リモートセンシング技術センター、宇宙開発事業団地球観測センターの方々に、衛星データ入手についてお世話になり、解析結果の出力過程では千葉大工学部天然色工学研究施設の江森研究室と、富士写真フィルム宮台技術開発センターでそれぞれ試作中の画像処理装置を使わせていただき、研究所内における計算作業では電算機管理室の古川満信システム設計専門官、松戸修管理係長(現在は分子科学研究所)、業務室増田啓子照会係長に、プログラム作成その他の面でお世話になった。

なお、国内で受信したランドサットのデータのすべては、宇宙開発事業団地球観測センターから提供されたものであり、また、カラー空中写真および5万分の1と2万5千分の1の地形図は国土地理院作成のものを使用した。関係者の御好意に感謝します。

参 考 文 献

- キャノンイメージ編集室 (1974) : Remote Sensing. キャノン, p. 85.
- 樋口敬二・大畑哲夫・渡辺興亜 (1979) : 剣沢圍谷, 多年性雪渓はまぐり雪の規模の変動, 雪水, 41, 77-84.
- 石塚和雄 (1948) : 八甲田山における積雪と植物群落の関係——特に雪田の植物群落について, 生態学研究, 11, 193-203.
- 石塚和雄・菊地政雄・岩田悦行ほか (1966) : 岩手県夏油・焼石・湯田地域の生物相, 栗駒自然公園学術調査報告, 日本自然保護協会, p. 107-114.
- 石塚和雄・橘ヒサ子・斎藤員郎 (1972) : 鳥海山の植生, 鳥海山・飛鳥, 山形県総合学術調査会, p. 52-88.
- 石塚和雄・斎藤員郎・橘ヒサ子 (1975) : 月山および葉山の植生, 出羽三山 (月山・羽黒山・湯殿山)・葉山, 山形県総合学術調査会, p. 59-124.
- 科学技術庁 (1976) : リモートセンシング情報利用の開発に関する総合研究 (昭和48・49・50年 特別研究促進調整費).
- 環境庁 (1976) : 自然環境保全調査報告書 (第1回緑の国勢調査), 401 p.
- 環境庁 (1981) : 現存植生図 (鳥海山, 山形, 上山ほか).
- 環境庁 (1982) : 第2回自然環境保全基礎調査報告書 (緑の国勢調査), 540 p.
- 建設省 (1972) : 比企丘陵現存植生図.
- 建設省国土地理院 (1978) : 2万5千分1基本図測量修正測量作業規程, 日本測量協会, 99 p.
- 木暮 翠 (1981) : アルタイから来た蝶ベニヒカゲ, 筑地書館, 221 p.
- 国立防災科学技術センター (1982) : 地すべり地形分布図第1集, 防災科学技術研究資料 No. 69 (新庄地区5万分1図16面).
- 久保田利一 (1983) : 伊吹山の気候, 気象, 27(8), 8-11.

- 宮脇 昭・大場達之・奥田重俊・中山 冽・藤原一絵 (1968)：越後三山・奥只見周辺の植生・越後三山・奥只見自然公園学術調査報告書。日本自然保護協会。p. 57-152.
- 中川正之・川田邦夫・清水 弘・秋田谷英治 (1976)：立山の積雪の性質の研究。雪氷, 38, 157-164.
- 沼田 真 (1971)：日本の山岳の垂直分布帯と富士山植生の特性および研究史。富士山, p. 347-357.
- 沼田 真・岩瀬 徹 (1975)：図説日本の植生。朝倉書店, 178 p.
- 小笠原和夫・安斉 徹・四手井綱英・太田 裕 (1956)：月山の積雪調査。山形県総合開発資料。月山朝日山系総合調査報告書-1955, p. 230-267.
- 小笠原和夫 (1965)：北アルプス立山・剣の積雪調査。北アルプスの自然, 古今書院, p. 123-151.
- 小笠原和夫・藤平彬文 (1966)：北アルプス剣沢と内蔵之助沢の積雪水量——高山積雪の航空写真測量の可能性。黒部川, 古今書院, p. 113-119.
- リモートセンシング技術センター (1979)：人工衛星による環境情報の収集・利用に関する調査報告書 (昭和 53 年度環境庁委託), 184 p.
- 仙台管区気象台 (1974)：異常気象調査報告, 昭和 49 年 1 月～2 月の東北地方の大雪について。昭和 49 年異常現象調査報告第 1 号, 78 p.
- 四手井綱英 (1952)：奥羽地方の森林帯 (予報)。日本林学会東北支部会誌, 2(2), 2-8.
- 四手井綱英 (1956)：裏日本の亜高山帯の一部に針葉樹林の欠如する原因についての一つの考え方。日本林学会誌, 38, 356-358.
- 白畑孝太郎・黒沢良彦 (1972)：鳥海山・飛島の昆虫類。鳥海山・飛島, 山形県総合学術調査会, p. 218-262.
- 白畑孝太郎・黒沢良彦 (1975)：出羽三山 (月山・湯殿山・羽黒山)・葉山の昆虫類。出羽三山・葉山, 山形県総合学術調査会, p. 229-260.
- 鈴木時夫 (1957)：視野の尺度による植物社会の環境の差異——白山の雪田群落よりかえりみて。日本生態学会誌, 6, 184-189.
- 鈴木時夫・二村昭人 (1966)：積雪と植生, 立山平東斜面の帯状測定。日本生態学会誌, 16, 191-199.
- 橋ヒサ子 (1972)：八幡沼湿原および黒谷地湿原の登山者による植生破壊の現状について。日本自然保護協会調査報告第 42 号, 98-131.
- 高橋啓二 (1960)：植物分布と積雪。森林立地, 2, 19-24.
- 高崎正義・五百沢智也 (1964)：積雪深の分布と地形。地学雑誌, 73, 23-40.
- 武田 要 (1983)：積雪調査への応用。資源 (リモートセンシング特集) No. 216, 45-53.
- 田辺和雄 (1975)：原色日本植物生態図鑑。保育社, 141 p.
- 土屋 巖 (1973)：日本における越年性積雪の水資源上の問題と気候変動の指標としての役割。気象研究ノート, No. 117, 606-616.
- 土屋 巖 (1976 a)：積雪量の判読解析に関する研究。科学技術庁, リモートセンシング研究連絡会議編, リモートセンシング情報利用技術の開発に関する総合研究, III-17-45.
- 土屋 巖 (1976 b)：飯豊山・月山・鳥海山の大量積雪および小規模氷河現象発生についての序報。雪氷, 38, 178-187.
- 土屋 巖 (1977 a)：日本の現存氷河と環境問題。地理, 22(8), 100-107.
- 土屋 巖 (1977 b)：鳥海山貝形小氷河の雪氷気候学的研究 (1)——年々変動と年層構造。雪氷, 39, 65-76.
- 土屋 巖 (1978 a)：鳥海山貝形小氷河の雪氷気候学的研究 (2)——形態測量と流動観測。雪氷, 40, 1-9.
- 土屋 巖 (1978 b)：鳥海山貝形小氷河の雪氷気候学的研究 (3)——リモートセンシングを利用した温度解析と氷河としての特色。雪氷, 40, 10-21.
- 土屋 巖 (1980)：ランドサットおよび航空機の MSS による山地残雪領域の判別についての序報。日本国土海洋総合学術診断昭和 54 年度技術報告集——国土関係, 日本造船振興財団, 203-210.
- 土屋 巖 (1981)：ランドサットデータによる鳥海山の残雪の季節推移の数値解析。雪氷, 43, 155-161.
- 土屋 巖 (1982)：NOAA-6 AVHRR による都市ヒートアイランドの検出。天気, 29, 261-263.
- 土屋 巖 (1983)：小さなダムの流量報告に基づく鳥海山の残雪流出解析。天気, 30, 590-594.

- 土屋 巖・松戸 修・広崎昭太・宇都宮陽二郎・松本幸雄 (1980) : ランドサット磁気テープによる霞ヶ浦富栄養化現象の数値解析. 写真測量とリモートセンシング, **19**, 4-14.
- 宇宙開発事業団地球観測センター (1982) : 地球観測データ利用ハンドブック.
- 若浜五郎・山田知充 (1979) : 大雪山の雪渓調査報告. 雪氷, **41**, 11-18.
- 山形県 (1956) : 山形県総合開発資料, 月山朝日山系総合調査報告書 —— 1955. 287 p.
- 山形県 (1957) : 山形県総合開発資料, 月山朝日山系総合調査報告書 —— 1956. 317 p.
- 山形県 (1976) : 山形県現存植生図. 39 charts+10 p.
- 山形県 (1972) : 鳥海山・飛鳥. 412 p.
- 山形県 (1979) : 第2回自然環境保全基礎調査植生調査報告書.
- 山中英二 (1979) : 飯豊山地御西岳付近の雪窪. 東北地理, **31**, 36-45.
- 結城嘉美 (1974) : 月山の雪田植生. 地理, **19**(2), 60-67.
- Aul, J. S. and P. F. Ffolliott (1975) : Use of areal snow cover measurements from ERTS-1 Imagery in snowmeltrunoff relationships in Arizona. A. Rango ed. Operational applications of satellite snowcover observations, NASA SP-391, 103-112.
- Barnes, J. C. and C. J. Bowley 1968 : Snow cover distribution as mapped from satellite photogrophy. Water Resources Res., **4**, 257-271.
- Deutsch, W., D. R. Wiesnet and A. Rango (1981) : Satellite hydrology. American Water Resources Association, 730 p.
- Greig-Smith, P. (1983) : Quantitative plant ecology. Blackwell Sci. Pub., 3rd ed. p. 151. (Jaccard, P., 1912, The distribution of the flora in the alpine zone, New Phytol. **11**, 37-50.)
- Haefner, H. (1980) : Snow-cover monitoring from satellite data under European conditions. Remote sensing application in agriculture and hydrology, ed. by G. Fraysse. p. 339-372.
- McGinnis, D. F., Jr., J. A. Pritchard and D. R. Wiesnet, 1975 : Snow depth and snow extent using VHRR data from the NOAA-2 satellite. NOAA Tech, Mem, NESS 63, 9p.
- Midorikawa, B. (1959) : Growth-analytical study of *Altherbosa* on Mt. Hakkoda, North-east Japan. Ecolo. Rev., **15** (2), 83-117.
- Masuzawa, T. (1977) : Ökologische Beobachtungen zur standörtlichen Variabilität der Volumsdichte (bulk density) von Speicherrhizomen von *Geum montanum* L. im alpinen Grasheidegürtel der Hohen Tauern. Veröffentlichungen des Österreichischen MaB-Hochgebirgsprogrammes Hohe Tauern, Band 1, Alpine Grasheide Hohe Tauern, Ergebnisse der Ökosystemstudie 1976, Univ. Wagner, Innsbruck, p. 103-110.
- Reeves, R. G. (1975) : Manual of remote sensing. American Society of Photogrammetry, pp. 805-856.
- UNESCO/IAHS (1970) : Perennial ice and snow masses. Technical Papers in Hydrology, No. 1, Paris, 59 p.

国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 — 霞ヶ浦を対象域として — 昭和51年度. (1977)
第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51, 52年度 研究報告.
(1978)

(改 称)

国立公害研究所研究報告

- 第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属9種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和52年度 中間報告.
(1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素-窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究 — 昭和51, 52年度 研究報告. (1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅱ) — 霞ヶ浦を中心として. — 昭和53年度. (1979)
- 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和52, 53年度 研究報告. (1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和53年度 中間報告.
(1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51~53年度 特別研究報告.
(1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
(コンピュータ制御装置を利用したフレームおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
(多摩川に発生するユスリカの研究
— 第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係 —
— 第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について —)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53, 54年度 特別研究報告. (1980)
- 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和54年度 特別研究報告. (1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測. (1980)
- 第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果 — 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 昭和53, 54年度 特別研究報告. (1980)

- 第 18 号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- 第 19 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅲ) — 霞ヶ浦 (西浦) の湖流 — 昭和53, 54年度.
(1981)
- 第 20 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅳ) — 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖
水環境に及ぼす影響 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 21 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅴ) — 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価 —
昭和53, 54年度. (1981)
- 第 22 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅵ) — 霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量 — 昭和53,
54年度. (1981)
- 第 23 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅶ) — 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究 —
昭和53, 54年度. (1981)
- 第 24 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅷ) — 富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関す
る研究 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 25 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅸ) — [*Microcystis*] (藍藻類) の増殖特性 — 昭和53,
54年度. (1981)
- 第 26 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅹ) — 藻類培養試験法による A G P の測定 — 昭和53,
54年度. (1981)
- 第 27 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 (Ⅺ) — 研究総括 — 昭和53, 54年度. (1981)
- 第 28 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告. (1981)
- 第 29 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)
Part 3. Species of the subfamily Orthocladiinae recorded at the summer survey and their distri-
bution in relation to the pollution with sewage waters.
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
(多摩川に発生するユスリカ類の研究
— 第 3 報 夏期の調査で見出されたユスリカ亜科 Orthocladiinae 各種の記載と, その分
布の下水汚染度との関係について —
— 第 4 報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載 —)
- 第 30 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報
告. (1982)
- 第 31 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和55年度
特別研究報告. (1981)
- 第 32 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気中における
光化学二次汚染物質生成機構の研究 (フィールド研究 1) — 昭和54年度 特別研究報告. (1982)
- 第 33 号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 大気運動と大気拡散過程のシミュレーション
— 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 34 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 35 号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究. (1982)
- 第 36 号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究 — 昭和55, 56年度 特別研究報告.
(1982)
- 第 37 号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究. (1982)
- 第 38 号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
(環境標準試料「池底質」の調製, 分析及び保証値)
- 第 39 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1982)

- 第 40 号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和56年度 特別研究報告。(1983)
- 第 41 号 土壤環境の遠隔計測と評価に関する統計学的研究。(1983)
- 第 42 号 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。(1983)
- 第 43 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)
 Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June with description of 15 new species.
 Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.
 Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.
 (多摩川に発生するユスリカ類の研究
 — 第 5 報 本流に発生するユスリカ類の分布に関する 6 月の調査成績とユスリカ亜科に属する 15 新種等の記録 —
 — 第 6 報 多摩本流より 6 月に採集されたエリユスリカ亜科の各種について —
 — 第 7 報 多摩本流より 3 月に採集されたユスリカ科の各種について —)
- 第 44 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究。 — 環境大気における光化学二次汚染物質生成機構の研究 (フィールド研究 2) — 昭和54年度 特別研究中報告。(1983)
- 第 45 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53年~55年度 特別研究報告。(1983)
- 第 46 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告 第 1 分冊。(1983)
- 第 47 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壤生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和54, 55年度 特別研究報告 第 2 分冊。(1983)
- 第 48 号 水質観測点の適正配置に関するシステム解析。(1983)
- 第 49 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 50 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (I) — 霞ヶ浦の流入負荷量の算定と評価 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 51 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (II) — 霞ヶ浦の湖内物質循環とそれを支配する因子 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 52 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (III) — 霞ヶ浦高浜入における隔離水界を利用した富栄養化防止手法の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 53 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (IV) — 霞ヶ浦の魚類及び甲殻類現存量の季節変化と富栄養化 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 54 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (V) — 霞ヶ浦の富栄養化現象のモデル化 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 55 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VI) — 富栄養化防止対策 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 56 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VII) — 湯の湖における富栄養化とその防止対策 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 57 号 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究 (VIII) — 総括報告 — 昭和55~57年度 特別研究報告。(1984)
- 第 58 号 環境試料による汚染の長期的モニタリング手法に関する研究 — 昭和55~57年度 特別研究総合報告。(1984)

- 第 59 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 光化学スモッグチャンバーによるオゾン生成機構の研究 — 大気中における有機化合物の光酸化反応機構の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告(第1分冊). (1984)
- 第 60 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 光化学エアロゾル生成機構の研究 — 昭和55~57年度 特別研究報告(第2分冊). (1984)
- 第 61 号 炭化水素-窒素酸化物-硫黄酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究(フィールド研究1) — 昭和55~57年度 特別研究報告(第3分冊). (1984)
- 第 62 号 有害汚染物質による水界生態系のかく乱と回復過程に関する研究 — 昭和56~58年度 特別研究中間報告. (1984)
- 第 63 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1984)
- 第 64 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54~56年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 65 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 1. (1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響 — 第1分冊)
- 第 66 号 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants—Part 2. (1984)
(複合大気汚染の植物に及ぼす影響 — 第2分冊)
- 第 67 号 環境中の有害物質による人の慢性影響に関する基礎的研究 — 昭和54~56年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 68 号 汚泥の土壌還元とその環境に関する研究 — 昭和56~57年度 特別研究総合報告. (1984)
- 第 69 号 中禅寺湖の富栄養化現象に関する基礎的研究. (1984)
- 第 70 号 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park (1984)
Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park.
Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park.
(日光国立公園の湖沼のユスリカに関する研究
— 第1部 日光国立公園の湖のユスリカの生態学的研究 —
— 第2部 日光国立公園の湖沼に生息するユスリカ類の分類学的, 形態学的研究 —
- 第 71 号 リモートセンシングによる残雪及び雪田植生の分布解析. (1984)

Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1976. (1977)
- No. 2* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1977. (1978)

[Starting with Report No. 3, the new title for NIES Reports was changed to:]

Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1977. (1978)
- No. 5* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells – Research report in 1976-1977. (1978)
- No. 6* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1977-1978. (1979)
- No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- No. 8* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1979)
- No. 9* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1978. (1979)
- No.10* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976-1978. (1979)
- No.11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No.12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No.13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
- Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
- Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No.14* Studies on the effects of organic wastes on the soil ecosystem – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.15* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977-1978. (1980)
- No.16* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- No.17* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes – Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Progress report in 1978-1979. (1980)
- No.18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- No.19* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978-1979. (1981)
- No.20* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Geomorphological and hydrometeorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment – 1978-1979. (1981)

- No.21* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.22* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura – 1978-1979. (1981)
- No.23* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Applicability of trophic state indices for lakes – 1978-1979. (1981)
- No.24* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources – 1978-1979. (1981)
- No.25* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Mycrocystis* – 1978-1979. (1981)
- No.26* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of algal growth potential by algal assay procedure – 1978-1979. (1981)
- No.27* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Summary of researches – 1978-1979. (1981)
- No.28* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Progress report in 1979-1980. (1981)
- No.29 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)
 Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.
 Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- No.30* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1979-1980. (1982)
- No.31* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1980. (1981)
- No.32* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No.33* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Simulation of atmospheric motions and diffusion processes – Progress report in 1980. (1982)
- No.34* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1980. (1982)
- No.35* Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic. (1982)
- No.36* Studies on the method for long term environmental monitoring – Progress report in 1980-1981. (1982)
- No.37* Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy – The evaluation laboratory of Man-environment Systems. (1982)
- No.38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
- No.39* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1981. (1983)
- No.40* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1981. (1983)
- No.41* Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil. (1983)
- No.42* Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud transportation. (1983)
- No.43 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1983)

Part 5. An observation on the distribution of Chironominae along the main stream in June, with description of 15 new species.

Part 6. Description of species of the subfamily Orthoclaadiinae recovered from the main stream in the June survey.

Part 7. Additional species collected in winter from the main stream.

- No.44* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 2). (1983)
- No.45* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Outlines of special research project – 1978-1980. (1983)
- No.46* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Research report in 1979-1980, Part 1. (1983)
- No.47* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Research report in 1979-1980, Part 2. (1983)
- No.48* Study on optimal allocation of water quality monitoring points. (1983)
- No.49* The development and evaluation of remote measurement method for environmental pollution – Research report in 1982. (1984)
- No.50* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Estimation of input loading of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.51* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – The function of the ecosystem and the importance of sediment in national cycle in Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.52* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Enclosure experiments for restoration of highly eutrophic shallow Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.53* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Seasonal changes of the biomass of fish and crustacia in Lake Kasumigaura and its relation to the eutrophication. – 1980-1982. (1984)
- No.54* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Modeling the eutrophication of Lake Kasumigaura. – 1980-1982. (1984)
- No.55* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Measures for eutrophication control. – 1980-1982. (1984)
- No.56* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Eutrophication in Lake Yunoko. – 1980-1982. (1984)
- No.57* Comprehensive studies on the eutrophication control of freshwaters – Summary of researches. – 1980-1982. (1984)
- No.58* Studies on the method for long term environmental monitoring – Outlines of special research project in 1980-1982. (1984)
- No.59* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Photochemical ozone formation studied by the evacuable smog chamber – Atmospheric photooxidation mechanisms of selected organic compounds – Research report in 1980-1982, Part 1 (1984)
- No.60* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Formation mechanisms of photochemical aerosol – Research report in 1980-1982, Part 2 (1984)
- No.61* Studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen-sulfur oxides system – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). – Research report in 1980-1982, Part 3. (1984)

- No.62* Effects of toxic substances on aquatic ecosystems – Progress report in 1980-1983. (1984)
- No.63* Eutrophication and red tides in the coastal marine environment – Progress report in 1981. (1984)
- No.64* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Final report in 1979-1981. (1984)
- No.65 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 1. (1984)
- No.66 Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Part 2. (1984)
- No.67* Studies on unfavourable effects on human body regarding to several toxic materials in the environment, using epidemiological and analytical techniques – Project research report in 1979-1981. (1984)
- No.68* Studies on the environmental effects of the application of sewage sludge to soil – Research report in 1981-1983. (1984)
- No.69* Fundamental studies on the eutrophication of Lake Chuzenji – Basic research report. (1984)
- No.70 Studies on chironomid midges in lakes of the Nikko National Park – Part I. Ecological studies on chironomids in lakes of the Nikko National Park. – Part II. Taxonomical and morphological studies on the chironomid species collected from lakes in the Nikko National Park. (1984)
- No.71* Analysis on distributions of remnant snowpack and snow patch vegetation by remote sensing. (1984)

* in japanese

RESEARCH REPORT FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

No. 71

国立公害研究所研究報告 第71号

(R-71-'84)

昭和59年3月31日発行

編集 国立公害研究所編集委員会
発行 環境庁国立公害研究所

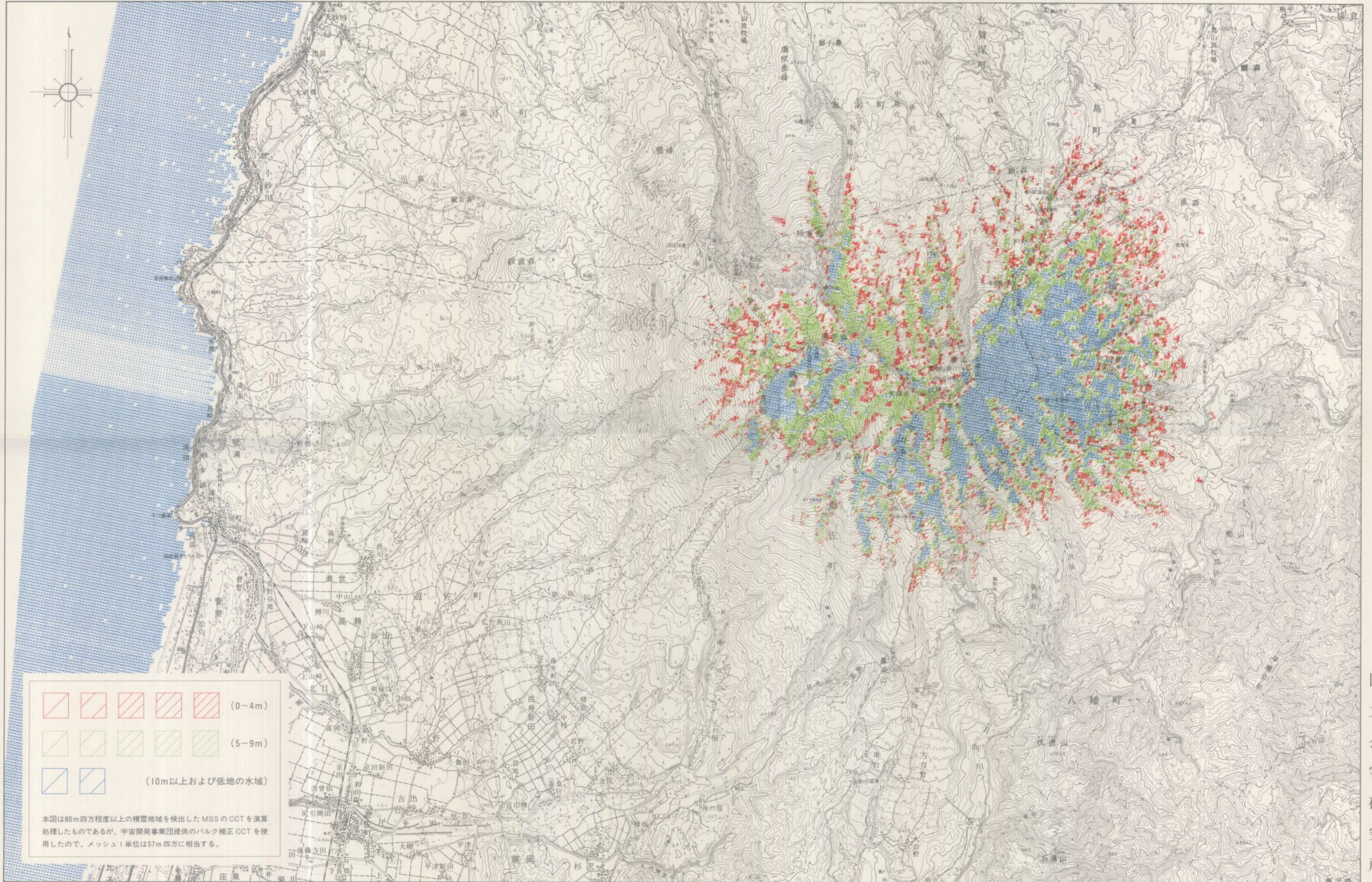
茨城県筑波郡谷田部町小野川16番2




印刷 前田印刷株式会社筑波支店
茨城県筑波郡谷田部町東新井14-5

Published by the National Institute for Environmental Studies
Yatabe-machi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan.
March 1984

ランドサット CCT による1979年5月22日の
鳥海山残雪深度階級区分図

原図 昭和五十五年九月八日作成



-  (0~4m)
-  (5~9m)
-  (10m以上および低地の水域)

本図は80m四方程度以上の積雪地域を検出したMSSのCCTを演算処理したものであるが、宇宙開発事業団提供のバルク補正CCTを使用したため、メッシュ1単位は57m四方に相当する。

1:50,000

この地図は、建設省国土地理院長の承認を得て同院発行の5万分の1地形図を複製したものである。
(昭55、総復 第654号)

国立公害研究所