

平成 29 年度 卒業論文

多雪山地亜高山帯の溶岩台地上における
湿原と森林の指交関係の成因

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

201410758

榎本壮平

2018 年 1 月

目次

目次	i
要旨	iii
Abstract	v
表目次	viii
図目次	ix
写真目次	xi
本文	
第1章 はじめに	1
1-1. 多雪山地の沼沢化型湿原における先行研究	1
1-2. 本研究の目的と枠組み	2
第2章 調査地域および手法	4
2-1. 調査地域	4
2-1-1. 苗場山	4
2-1-2. 小松原	5
2-2. GIS 解析	6
2-2-1. 総観植生図の作成	6
2-2-2. 地形量の解析	7
2-3. 現地調査	8
2-3-1. 積雪深	8
2-3-2. 土壌水分	9

2-3-3. 電気比抵抗	9
2-3-4. 土壤断面・土層厚	10
第3章 結果	11
3-1. GIS 解析	11
3-1-1. 植生別面積	11
3-1-2. 植生と斜面傾斜	11
3-1-3. 植生と斜面曲率	12
3-1-4. 植生と斜面方位	12
3-2. 現地調査	13
3-2-1. 各測線の断面形と植生	13
3-2-2. 土壤断面	14
3-2-3. 土層厚	15
3-2-4. 積雪深分布	16
3-2-5. 表土の含水率	17
3-2-6. 土壤水・地下水の分布	17
第4章 考察	20
4-1. 植生と地形、積雪深、土壤水分の関係	20
4-2. 指交関係の成立要因	21
4-3. 微起伏の有無と指交関係	22
4-4. 湿原の発達史と指交関係	22
第5章 結論	24
謝辞	25
引用文献	26

多雪山地亜高山帯の溶岩台地上における

湿原と森林の指交関係の成因

榎本 壮平

要旨

多雪山地亜高山帯の火山性緩斜面上には数多くの湿原があり、その一部では、湿原と森林が交互に並ぶ分布パターンが見られる。これを湿原と森林の指交関係と名付け、その成因を明らかにすることを研究目的とした。

苗場山山頂付近には、ほぼ平坦な湿原に高さ数 m の段差が接するところで、ササ地の斜面を挟んで凸部が森林となった指交関係が多く見られる。ただし、そうした微起伏が存在しなくても指交関係を呈する場所もある。また、苗場山の約 3 km 北の小松原という火山性緩斜面に点在する湿原では、指交関係がほとんど見られない。そこで、苗場山と小松原の 2 地域を対象に、各植生と、地形、積雪深、土壤水分の関係を定量的に検討した。それらに土層厚や土壤構造のデータも加味し、指交関係の成因を議論した。

地理情報システム (GIS) 上で空中写真を表示させ、苗場山と小松原における総観植生図を作成した。また、5 m メッシュの標高データから、標高、斜面傾斜、曲率、斜面方位を算出し、各地形量と植生の関係を統計的に解析した。苗場山の 4 カ所、小松原の 1 カ所に、森林の帯状分布に対して垂直な測線を設け、それらに沿って積雪深、土壤水分、土層厚を測定し、また植生ごとの土壤構造も調べた。

苗場山では、微起伏による傾斜、曲率、斜面方位に応じて、積雪深や土壌水分が異なり、植生が異なっていた。森林がある凸状部とその風上側斜面では、積雪が浅く、秋季の土壌水分も低かった。そこは消雪が早いため植物の生育期間が長く、樹木の生育に適していると考えられた。一方、湿原のある平坦面は風下に位置し、積雪が厚く、秋季も湛水していた。そこでは消雪時期が遅く、植物の生育期間が短いうえに、緩傾斜で排水しにくいために湿原になったと考えられる。凸状部の主に風下斜面では、積雪は厚いが、排水されるため秋季にはやや乾燥し、ササが生育していた。つまり、何列もあるこうした微起伏によって、湿原と森林の生育適地が交互に現れるため指交関係が成立している。

一方、苗場山では標高が下がると湿原の分布域が縮小し、より湿原が少ない小松原も含め、指交関係が不明瞭になる。しかし、苗場山と小松原のいずれでも、湿原が泥炭からなるだけではなく、ササ地と森林の腐植土の下にも泥炭が見られ、かつて湿原がより広範囲にあったことを示唆した。低標高ほど、森林の侵入時期が早かったことと、融雪が早く乾燥しやすかったことで、森林の侵入が進んでいると思われた。また、微起伏が存在しない平坦面に指交関係が成立する地点では、湿原の土層が森林やササ地に比べて厚かった。そうした場所では、泥炭が堆積して微起伏を平坦化させたが、指交関係は残存していると考えられる。

キーワード：湿原、多雪山地、溶岩台地、苗場山、指交関係、GIS

Processes forming interfingering distribution of moor and forest on lava plateaus in a subalpine zone with heavy snowfall

Sohei Enomoto

Abstract

Many moors distribute on gentle volcanic slopes in the subalpine zone along the Japan Sea, where a large amount of snow accumulates in winter. Some moors are interrupted by forests, each of which stands in a line, and they show an interfingering pattern of the distribution. This study discusses the processes that form this unique pattern.

On the studied volcano, Mt. Naeba, moors spread out on nearly flat summit plateau, whereas forests line the convex edge of steps several meters high on the plateau and bamboo grasses cover slope of the steps. The interfingering pattern, however, was also found on some flat places without any steps. In addition, such an interfingering pattern is unclear on the volcanic plateau called Komatsubara located about 3km north of Mt. Naeba. To discuss the interfingering pattern, the topography, snow depth and soil moisture of the three types of the vegetation were quantitatively compared, and thickness and structure of their soils were also studied.

Digital maps of the three types of the vegetation were made on aerial

photographs displayed on a GIS software. Then, altitudes, slope angles, curvatures and slope directions for each vegetation were statistically analyzed. Along four transects perpendicular to linear forests on Mt. Naeba and one on Komatsubara, topography, snow depth, soil moisture and soil thickness were measured. Soil structure of each vegetation was also described on the transects.

On Mt. Naeba, the differences in slope direction, angle, and curvature depending on the distribution of the steps controlled the amount of snow cover and soil moisture. The convex edge and windward slope of steps covered with trees had less snow in spring and dry soil in autumn. The long season without snow must be the key process to allow the forest growing. In contrast, the moors located on the leeward, flat surface had thick snow in spring and saturated soil in autumn. In addition to the limited growing season by the long-lasting snow, the saturated soil probably prevents trees from growing on the moors. The bamboo grasses are the best vegetation on the leeward slope covered with thick snow in spring and well drained in autumn. Through the processes mentioned above, small steps on the plateau form the interfingering pattern of the vegetation.

The area occupied by moors decreases downward on Mt. Naeba, and interfingering pattern become unclear on the moors on Komatsubara. Peat developed in the moors was, however, widespread even below the humus of the bamboo grasses and forests on the plateau. This peat suggests that moors have shrunk from the lower elevation possibly because of the earlier snowmelt. Along the two transects without any steps, the soil below the moors was deeper than that

of the other vegetation. The original steps were probably buried by the accumulation of peat after the forest formation on the convex part.

Keywords: moor, mountains with heavy snowfall, lava plateau, Mt. Naeba, interfingering pattern, GIS

表目次

表 1	空中写真を用いた植生の判読基準	28
表 2	空中写真測量の地上基準点データ	29
表 3	測線 K における積雪深測定地点データ	30
表 4	苗場山の各植生の面積	31
表 5	小松原の各植生の面積	32

図目次

図 1	苗場山山頂部における湿原と森林の指交関係の例	33
図 2	地形因子が植生に作用する二つの経路	34
図 3	苗場山の位置	35
図 4	苗場山地域の地形図と湿原の分布	36
図 5	苗場山の地形図	37
図 6	小松原の地形図	38
図 7	植生境界の判読例	39
図 8	苗場山の総観植生	40
図 9	小松原の総観植生	41
図 10	苗場山山頂部と小松原の GIS 解析範囲における総観植生	42
図 11	GIS 解析範囲の斜面傾斜	43
図 12	GIS 解析範囲の曲率	44
図 13	GIS 解析範囲の斜面方位	45
図 14	苗場山山頂部の現地調査地点	46
図 15	小松原の現地調査地点	47
図 16	UAV を用いた空中写真測量の GCP 設置地点	48
図 17	苗場山における標高 50m ごとの各植生の出現率	49
図 18	苗場山の傾斜 1 度ごとの植生別度数分布	50
図 19	小松原の傾斜 1 度ごとの植生別度数分布	51
図 20	苗場山の曲率 0.5 ごとの植生別度数分布	52
図 21	小松原の曲率 0.5 ごとの植生別度数分布	53

図 22	苗場山の斜面方位（8 方位）に対する植生別出現率	54
図 23	小松原の斜面方位（8 方位）に対する植生別出現率	55
図 24	測線 N1～N4 の断面形と植生	56
図 25	測線 K の断面形と植生	58
図 26	測線 N1～N4 の土壌断面	59
図 27	測線 K の土壌断面	60
図 28	測線 N1～N4 の断面形と土層厚分布	61
図 29	測線 K の断面形と土層厚分布	65
図 30	苗場山山頂部の空撮範囲における積雪の平面分布	66
図 31	苗場山山頂部の空撮範囲における積雪深分布	67
図 32	2017 年 5 月 21 日の測線 N2 の積雪深分布	68
図 33	2017 年 5 月 15 日の測線 K の積雪深分布	68
図 34	測線 N1～N4 における 9・10 月の植生別土壌含水率	69
図 35	測線 K における 10 月の植生別土壌含水率	70
図 36	測線 N2 の断面形と地下の比抵抗構造	71
図 37	測線 N3 の断面形と地下の比抵抗構造	72
図 38	測線 K の断面形と地下の比抵抗構造	73
図 39	植生と地形、積雪深、土壌水分の対応関係	74
図 40	湿原と森林の指交関係の成因	75

写真目次

写真 1	苗場山山頂の景観	76
写真 2	苗場山における湿原と森林の境界部（微起伏が存在する）	77
写真 3	苗場山における湿原と森林の境界部（微起伏が存在しない）	78
写真 4	小松原上ノ代の景観	79
写真 5	電気探査の様子（苗場山の測線 N2）	80
写真 6	湿原の土壌の露頭	81

第1章 はじめに

1-1. 多雪山地の沼沢化型湿原における先行研究

多雪山地の亜高山帯には、火山性の平坦面や緩斜面上に数多くの湿原が存在し、山地貧養湿原と呼ばれる（石塚, 1977）。このような湿原には、高山帯の湿性草原を作る植物が生育するため、気温によって規定される主植生が森林のところに草原の景観を形成する（柴田, 1985）。湿原の成因は、湖の埋積が進み湿性植物が繁茂するようになる陸化型と、土地が何らかの原因で過湿になる沼沢化型の二つに分類される（阪口, 1974）。

山地貧養湿原を対象にして、泥炭に含まれる花粉の分析によって過去の植生変遷を推定する研究が数多く行われてきた（例えば、叶内, 1987；守田, 1985；山中, 1963）。それらの結果を踏まえ、日本の山地貧養湿原の多くは、完新世温暖期以降の降雪量の増大によって過湿になって形成された沼沢化型であると考えられている（叶内, 1991）。一方で、その湿原の空間分布の規定要因に関する研究はあまり多くない。

高橋（1992）は大雪山における湿原の成立や分布の規定要因について論じた。大雪山では、泥炭層中の花粉分析によって約 5000 年前に湿原が拡大したことが明らかにされ、その要因として冷涼化による残雪の増加が挙げられた。また、湿原の分布が溶岩平坦面上の凹地と一致していることを示し、分布の支配要因として湛水しやすい地形条件を挙げた。安田・沖津（2006）は平ヶ岳山頂における湿原の分布の規定要因について論じた。6 月の残雪分布と植生の分布を調べた結果、積雪が遅くまで残る場所は植物の生育期間が短く、土壌水分も過剰なため、森林が成立せずに湿原になっていることを示した。このように、日本の沼沢化型湿原は、積雪が遅くまで残り、かつ滞水しやすい地形上に発達している。

日本の急な山地の森林限界上では、地形の違いに応じて主に積雪期間が異なることに

よって裸地・草地・ハイマツ地がモザイク状に分布することがよく知られている（小泉, 1974）。一方で、高橋（1992）が平坦面上の凹部に湿原が発達しやすいと述べたほかは、起伏の少ない湿原一帯において地形条件が景観を規定するかについて、ほとんど検討されていない。しかし、山地貧養湿原と森林がモザイク状の分布を示すことがあり、筆者は、それと地形条件との対応関係を検討する価値があると考えた。例えば、福島県南会津にある田代山、山形県と福島県の県境にある西吾妻山、新潟県と長野県の県境にある苗場山などの山頂の火山性の平坦および緩斜面上（写真 1）には、疎らに分布する森林が湿原と交互に並ぶように分布している（図 1）。国内において、このような植生分布に着目した研究は未だにない。そこで本研究では、この特徴的な植生分布を湿原と森林の指交関係と名付け、研究対象とした。

1-2. 本研究の目的と枠組み

湿原と森林の指交関係の研究にあたって、本研究では地生態学的なアプローチを採用した。地生態学とは、植物や植物群落、植生あるいは動物群衆の分布を、その地形、地質、気候、水文、土壌などの地学的な諸条件と、その地域の自然環境の変遷を考慮し、総合的に説明しようとする学問である（横山, 2002）。

その中で特に菊池（2001）は、植生に影響する因子として地形を強調した。それによれば、地形因子が植生に作用する経路は二つある（図 2）。一つは形態規制経路で、起伏に応じて異なる様々な地形量（例えば、標高、斜面方位、傾斜など）が気候因子や土壌因子の空間的差異を生み、それに応じて植生が決まる、というものである。もう一つは攪乱規制経路で、地表物質の移動から生まれる攪乱が、植物の更新や植生の変遷に影響を及ぼす、というものである。

本研究の対象である指交関係は緩斜面上の湿原とその周辺部に存在するため（写真 1）、

土砂移動による地表の攪乱の影響は少ないと考えられる。したがって、指交関係という植生分布を明らかにするために、形態規制経路を検討すればよいと考えられた。

数 m～数十 m スケールで植生が入れ替わる指交関係（図 1）にとっての形態規制経路を検討するために、筆者は、新潟県と長野県の県境にある苗場山における観察から、取得して検討すべきデータを考えた。苗場山の湿原と森林の境界部分には、多くの場合、高さ数 m 程度の堤防状の微起伏が存在し、その上部に森林が、下部に湿原が分布していた（写真 2）。そのため、この微起伏が指交関係にとって形態規制経路の端緒と推定できる。しかし苗場山の一部には、微起伏が存在しない平坦面にも関わらず、指交関係が成立している箇所も見られる（写真 3）。そこで本研究では、地理情報システム（GIS）を用いて、緩斜面一帯の詳細な数値標高モデルから地形量を抽出し、植生と微起伏の対応関係がどの程度あるのか調べることにした。

次に、こうした微起伏に、植生を直接規定する気象・水文要素や土壌組成が対応しているのか検討する必要がある。それらの規定要因は、地温や風向、積雪深、日射量、土壌水分など様々なものがある（水野, 1984, 1986 ; 渡辺, 1986）。本研究では多雪山地の湿原を対象としているため、高橋（1992）や安田・沖津（2006）の結果を参考にし、積雪深と土壌水分について計測することにした。また、湿原の発達史はその泥炭層から検討されること（卜部・片岡, 2013）を踏まえ、各植生における土壌構造や土層厚を調べ、指交関係との関連を議論する。

第2章 調査地域および手法

2-1. 調査地域

苗場山は長野県と新潟県の県境（図3）にある標高 2145 m の成層火山で、山頂部や山頂の約 3 km 北側にある小松原一帯に開析の進んでいない火山噴出物の緩斜面が広がる（図4）。この火山は更新世中期に活動し、4期の異なる時期に噴出した安山岩溶岩や火山砕屑物が堆積している（島津・立石, 1993）。本研究は、苗場山山頂部と小松原湿原がある緩斜面の2地域を対象に実施した。それぞれの地域を以後、苗場山、小松原と呼ぶ。

2-1-1. 苗場山

苗場山山頂部の緩斜面は、北西端の山頂（最高点）から南西約 4 km 先の標高 1795 m の地点に向けて、概ね西～南傾斜で広がる（図5）。この緩斜面は、火砕流堆積物を主とした溶岩を伴う第三期噴出物を主体とし、標高約 2000 m 以上ではそれに第四期噴出物の溶岩が重なっている。

山頂の北約 16 km に位置する津南（標高 457 m）の年平均気温は 10.6°C であり、気温減率を $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ として推定した山頂の年平均気温は -0.4°C である。また津南町の最大積雪深の平年値は 271 cm であり、年平均気温が 10°C 以上低い苗場山山頂の積雪深はそれ以上であると考えられる。また、輪島の 800 hPa 面（標高 2000 m 付近）における冬季（12～3月）の卓越風向の平年値は西（16方位中）である。

このような平坦な地形と多量の降雪によって、泥炭が発達した湿原が約 75 ha 広がっている（写真1）。放射性炭素年代の測定から、この湿原は約 7000 年前の完新世以降の温暖期に入って急速に発達したと推定されている（卜部・片岡, 2013）。湿原と森林の指交関係が顕著に見られるのは、山頂付近の第四期噴出物上（標高 2000 m 以上）である

(図 5)。したがって、後述する現地調査と GIS ソフトウェアを用いた解析は、標高 2000 m 以上の範囲（北西にある谷を除く）に限定した。

苗場山山頂部の植生は湿原、ササ地、森林の大きく 3 つに分類できる。以下に、それぞれの植生について述べる。

I. 湿原

湿原上には、高さ数 cm～10 cm 程度の様々な草本が草原を形成している。ミズゴケ、キンコウカ、イワイチョウ、コバイケイソウが優先する。これらは秋になると一面茶色に紅葉し、他植生との境界が明瞭になる（写真 3）。また、湿原内には直径数 m～10 m 程度の円形または楕円形の池が点在している。

II. ササ地

高さ約 30 cm～1 m 程度のササのみが広がる。主に、湿原と森林の間に分布する（写真 2, 3）。代表種はチマキザサである（石沢, 2003）。ササの下に他の植物はあまり見られない。

III. 森林

本研究では湿原とササ地以外の、高木と低木を含む領域を森林とした。林床にはチマキザサが密生しているが、ササ地より被植度が小さい。高木の代表種は、亜高山帯の優先種、オオシラビソである。オオシラビソは条件が良ければ樹高数十 m まで成長するが、苗場山山頂のオオシラビソは数 m 程度の背丈しかない（写真 3）。低木はミネカエデやナナカマドなどであり、低木のみで構成される群落は少ない。

2-1-2. 小松原

小松原湿原は、苗場山の第三期噴出物の上に点在する小規模な湿原の総称である（図 4）。小松原湿原を載せる緩斜面は、標高 1777 m の黒倉山を最高点として、標高 1245 m

地点まで南北約 4 km 広がっており、間に急斜面を挟み三段の平坦面のそれぞれに湿原がある（図 6）。その上段にあたる標高 1550 m 付近の湿原が上ノ代、中段にあたる標高 1500 m 付近の湿原が中ノ代、下段にあたる標高 1350 m 付近の湿原が下ノ代と呼ばれる。苗場山山頂と同様に、津南の年平均気温に気温減率を乗じて推定した上ノ代の年平均気温は 3.5℃である。また小松原の最大積雪深の平年値は、津南の 271 cm 以上であるが、標高が高い苗場山より浅いと考えられる。

小松原には、苗場山のような湿原と森林の指交関係がほとんど見られないが、上ノ代の一部に森林が湿原に挟まれている箇所がある（図 15）。そこでその場所において現地調査を実施した。苗場山との比較のための GIS 解析は、対象範囲を上ノ代の平坦面（標高 1540～1575 m）に限定して行った。

小松原の植生は苗場山と異なりササのみが広がる領域はなく、その植生は主に湿原と森林の 2 つに分類できる。

I. 湿原

苗場山と同様に草原を成し、湿性の草本が生育する（写真 4）。苗場山にはあまり見られないツルコケモモが群生している（石沢, 2003）。

II. 森林

高木と低木を含む領域を森林とする。林床にはチマキザサが密生する。高木は主に、オオシラビソとコメツガが混生している（写真 4）。低木にはベニサラドウダンやミネカエデ、ナナカマドが含まれ、主に湿原と高木の境界に分布している。

2-2. GIS 解析

2-2-1. 総観植生図の作成

山頂緩斜面と小松原の緩斜面（図 4）について、国土地理院が公開している幾何補正

済みの空中写真（簡易空中写真）を GIS ソフトウェア ArcMap 10.4.1（Esri 社製）上に表示させ、総観植生図を作成した（図 8, 9）。判読によって区分する植生は、湿原、ササ地、森林、裸地の 4 つとし、苗場山と小松原それぞれについて、GIS 上に各植生のポリゴンを作成した。植生の判読基準を表 1 のように設定し、図 7 に例示したように植生境界の判読をした。

2-2-2. 地形量の解析

調査地域の節で述べたように、GIS による地形量の解析の範囲は、苗場山の緩斜面上部と、上ノ代に限定した。そこで作成した植生のポリゴンから、GIS 解析の範囲に絞ったポリゴンを作成した（図 10）。そのうえ、国土地理院の航空レーザ測量成果を入手し、ArcMap の演算機能を用いて、対象範囲の標高、斜面傾斜、曲率、斜面方位を算出した。

元の標高データは点群データとなっているため、ArcGIS の変換ツールを用いて、水平分解能 5 m のラスタデータに変換した。この数値標高モデル（Digital Elevation Model : DEM）を以後、5 m DEM と呼ぶ。

5 m DEM から Spatial Analyst ツールの各種演算機能を用いて以下の地形量を求めた。斜面傾斜は Slope 演算によって算出した（図 11）。曲率は、Curvature 演算によって算出した。曲率には断面曲率と平面曲率があるが、本研究では平面曲率を算出した（図 12）。斜面方位は Aspect 演算によって算出した。斜面方位は真北を 0°とする度数法で表す（図 13）。

植生ごとの地形量を集計するために、Spatial Analyst ツールの Extract by Mask（マスクで抽出）機能を用いて、各植生のポリゴンの範囲における各植生のラスタデータを点群データに変換し、そのすべての座標点において各地形量が紐づけられている多変量データを作成した。

次に表計算ソフト（マイクロソフト社製、Excel 2016）を用いて、このデータの地形量ごとに階級幅を定め、植生別の度数分布図を作成した。階級の間隔は、標高が 50 m、斜面傾斜が 1°、曲率が 0.5 である。斜面方位は 8 方位に集約して度数分布を作成した。

2-3. 現地調査

現地調査を行うに当たり、苗場山の 4 カ所（N1～N4）、小松原の 1 カ所（K）に測線を設けた（図 14, 15）。各測線は、湿原と森林の両者が入るように植生の帯状分布に直交する向きに約 30 m の長さで設けた。

2017 年 10 月 8～10 日にレーザ距離計（Leica 社製、DISTO D510）を用いて、測線の簡易測量を行った。以下に、測線上および測線周辺で行った 4 項目の調査方法について述べる。

2-3-1. 積雪深

1) 苗場山

2017 年 5 月 21 日に測線 N1, N2 周辺（図 14）において、無人航空機（Unmanned aerial vehicle: UAV）の Phantom 2 Vision+（DJI 社製）を用いて空中写真を撮影した。この時、地上基準点（Ground Control Point: GCP）として対空標識を 6 カ所に設置し（図 16）、ディファレンシャル GPS 測器（Magellan 社製、Mobile Mapper CX）を用いて緯度・経度・標高を記録した。また、対空標識を設置した地点の積雪深を測深棒により測定した（表 2）。

次に Structure from Motion (Sfm) という写真解析を行うソフトウェアの PhotoScan Professional 1.3.0（Agisoft 社製）を用いて、撮影画像から三次元モデルを作成した。本来、この三次元モデル上の GCP に GPS で測定した緯度、経度、標高を入力することで、積

雪表面の数値表層モデル (Digital Surface Model: DSM) を出力できる。しかし、本研究で得られた GPS の標高値の誤差が大きかったため、積雪表面の標高値は、GPS の示した緯度・経度における 5 m DEM の標高値に実測した積雪深を足した値とした (表 2)。三次元モデルの位置精度を向上させるため、対空標識以外に位置情報を付与する地点として、地表が露出した 2 地点を選択した (図 16)。この 2 地点の緯度、経度、標高は国土地理院が整備したウェブサイト地理院地図から引用した (表 2)。

GCP を追加し位置精度を向上させた三次元モデルから積雪表面の DSM を作成し、ArcGIS の Spatial Analyst ツールの Raster Calculator (ラスタ演算) 機能を用いて、5 m DEM (無雪期の地表面を表す) との差分を取った。得られた差分値が積雪深に相当する。

2) 小松原

2017 年 5 月 15 日に測線 K に沿う 10 地点で、積雪深を測深棒により測定した。その際、Mobile Mapper CX を用いて測定地点の緯度・経度も記録した (表 3)。

2-3-2. 土壌水分

測線 N1~4 においては 9 月と 10 月に、測線 K においては 10 月に、土壌水分を調査した。簡易土壌水分計 (DELTA-T 社製、SM150・HH150) を用いて、各測線において植生ごとに 10 地点ずつ、表層 5 cm までの土壌含水率を測定した。

2-3-3. 電気比抵抗

測線 N2、N3、K において、2017 年 10 月 8~10 日に電気探査装置 (応用地質社製、Handy-Arm) を用いて地中の比抵抗分布を測定した (写真 5)。全ての測線において、32 本の電極を 1 m 間隔で設置した。そのうえで見かけ比抵抗値の 2 次元分布をウェンナー

配置で測定した。得られた見かけ比抵抗値は、解析ソフト Res2dinv 3.55 (Geotomo Software 社製) を用いて逆解析を行い、比抵抗分布を求めた。

2-3-4. 土壌断面・土層厚

測線 N1～4 においては 2017 年 9 月に、測線 K においては同年 10 月に、土壌断面を調査した。長さ 1 m の検土杖を用いて、各測線上で 1 つの植生について 1 地点で土壌断面を観察した。また、測線に沿って約 2 m 間隔で土層厚を測定した。

第3章 結果

3-1. GIS 解析

3-1-1. 植生別面積

苗場山の植生別の面積を表 4 に示した。苗場山の山頂緩斜面全体（図 8）の面積は 6.47km^2 であり、そのうち森林の占める割合が約 7 割と高く、ササ地は約 2 割、湿原は 1 割を占める。一方、最新の噴火期にほぼ対応する範囲（GIS 解析範囲、図 10）に限定すると、湿原（ 0.45km^2 ）とササ地（ 0.5km^2 ）が全面積の約 3 割ずつを占め、残りの約 4 割（ 0.68km^2 ）が森林となる。裸地はいずれの範囲でも 1% を満たないことから、以下の議論の対象から除外する。

また、標高が高いほど森林の出現率が減少する（図 17）。一方、ササ地は標高が高いほど増加する。湿原は、標高 2000 m 以下では出現率が 1 割に満たないのに対し、2000 m 以上では 1 割以上になる。特に標高 2050～2100 m で最も高く約 4 割を占める。

小松原の緩斜面全体（図 9）では、湿原が占める割合は約 1%（ 0.08km^2 ）にすぎず、地形量の解析範囲（上ノ代、図 10）でも、その割合は約 1 割（ 0.04km^2 ）であった（表 5）。前述したように、ここにはササ地がなく、残りは森林である。

苗場山の山頂緩斜面全体と比較すると、小松原全体の湿原面積は苗場山のおよそ 10 分の 1 と小さい。

3-1-2. 植生と斜面傾斜

苗場山では、傾斜の分布傾向がササ地と森林で似ており、湿原では異なっている（図 18）。湿原は最頻値が 4° で、湿原全体のうち約 9 割が 10° 以下の斜面に集中している。一方ササ地の最頻値は 7° 、森林は 6° で、湿原と比較すると $7\sim 15^\circ$ に出現する割合が高い。

小松原では、湿原の出現する傾斜の最頻値は 3° で、湿原全体のうち約9割が傾斜 5° 以下の斜面に集中している（図19）。森林は最頻値が 5° で、森林全体のうち約7割が傾斜 5° 以上の斜面に分布している。

苗場山と小松原の両地域ともに、湿原が緩傾斜のみに分布する傾向が見られる。湿原どうしに着目すると、小松原の湿原の方がより平坦なところだけに分布している。一方、森林の分布傾向は、苗場山と小松原でほとんど一致している。

3-1-3. 植生と斜面曲率

苗場山では、曲率の分布傾向がササ地と森林で似ており、湿原では異なっている（図20）。どの植生も最頻値が0に近い値を取っているが、湿原は約7割が曲率 $-1\sim1$ の平坦な立地に集中している。一方、ササ地と森林は同範囲の割合が約5割で、曲率 $1\sim5$ の尾根型の斜面に分布する傾向が見られる。

小松原では、湿原の出現する斜面の曲率は、最頻値が0で全体の37%を占める（図21）。また湿原全体の約9割が曲率 $-1\sim1$ の平坦な立地に集中している。森林も最頻値が0だがその出現率の11%にすぎず、曲率 $-1\sim1$ における出現率も全体の約4割しかない。

苗場山と小松原の両地域ともに、湿原は曲率が0に近い平坦な立地に分布する傾向が見られる。

3-1-4. 植生と斜面方位

苗場山の地形量の解析範囲は、全体的にみると南西向きに傾いており、5mDEMから計算した狭い範囲に限っても北向きの斜面は存在しない（図22）。植生別にみると、湿原とササ地は似た傾向を示し、森林は異なっている。湿原、ササ地は南向きに出現率がそれぞれ30%、25%と最も高く、次に南西が高い。斜面全体も南西や南向きをしており、

湿原とササ地の分布傾向は斜面全体のものと似ている。ただし、湿原の出現率は、斜面全体に比べて西向きで低く、南東側や南向きで高い。一方、森林の出現率は西向きに 41% と突出して高く、斜面全体の傾向とも大きく異なっている。冬季には西から季節風が卓越すると予想され、森林の立地しやすい斜面は風上向きといえる。それに対して、湿原は、風上向きの斜面に少なく、風下側（南東）や風向きの直交方向（南）に多い。

小松原の地形解析の対象範囲は全体的にやや北向きをしているが、方位による偏りは小さい（図 23）。湿原の出現割合は北向きの斜面に 32% と最も高く、次に北西向きが 27% となっており、斜面全体の傾向と大きく異なる。一方、森林の出現割合はどの方位も約 10% になっており斜面全体の傾向に近いが、北向きの斜面の割合は全体に比べてやや低い。

3-2. 現地調査

3-2-1. 各測線の断面形と植生

測線 N1 は測線の中で微起伏の規模が最大で、測線南端から微起伏の頂点（測線長 26 m 地点）までの比高はおよそ 10 m である（図 24a）。この頂点から北北西に下る傾斜約 10° の斜面上に森林が分布している。頂点の南南東には約 26° の斜面と、その下方に約 13° の斜面があり、それぞれササ地、湿原が分布する。測線の北端には、約 19° の南南東向き斜面に湿原が分布し、この湿原と南側の森林の間にもわずかにササ地が広がる。

測線 N2 の微起伏の比高はおよそ 3 m である（図 24b）。微起伏の頂点（測線長 23 m 地点）から北北西に下る傾斜約 3° の斜面上に森林が分布する。頂点の南南東には約 13° の斜面と、その下方に約 6° の斜面があり、それぞれササ地、湿原になっている。湿原の斜面の南側には流路が形成されている。森林の斜面の北側にも流路があり、流路沿いのやや急な斜面はササ地になっている。

測線 N3 は N2 と似た形状を示す (図 24c)。測線上には比高が約 4 m の微起伏があり、その頂点 (測線長 25 m 地点) から北西に下る傾斜約 7°の斜面に森林が分布する。頂点の南東には約 15°の斜面と約 5°の斜面があり、それぞれササ地、湿原となる。森林の斜面から北西側に下る約 7°の斜面にはササ地が広がる。

測線 N4 は上記 3 測線とは大きく異なり、微起伏がほとんど見られない平坦な地形に湿原、ササ地、森林の植物が棲み分けている (図 24d)。森林と湿原の境界付近 (測線長 6 m 地点) は周囲より 15 cm 程度高く、ササ地が広がる。その西側の傾斜約 3°の斜面に森林が、東側の約 3°の斜面に湿原が分布している。森林の西側には流路があり、流水の侵食で出来たと考えられる約 40°の急斜面はササ地となっている。

小松原の測線 K 沿いには、測線 N4 と同様に明瞭な微起伏はないが、植物の棲み分けが生じている (図 25)。測線始点から 30 m 地点までは東側にわずかに下る約 3°の斜面があり、その上に湿原が広がる。その西側の平坦面 (測線長 33~56 m 地点) には森林が分布する。森林と湿原の境界部には低木が茂る。森林の斜面の西側でも、約 7°の斜面に低木が分布する。

3-2-2. 土壌断面

苗場山の測線 N1~N4 の土壌断面は、植生ごとに共通した特徴がある (図 26)。湿原の土壌断面は、根茎が発達した表層から土壌下部にかけて密な泥炭層が見られる。泥炭層の下方には、母材である安山岩質溶岩 (もしくは火砕物) の風化物と考えられる礫質の層が現れる。ササ地と森林の土壌断面は、表層に厚さ 10 cm 程度の腐植層があり、その下方に泥炭層が見られる。泥炭層の下方には、湿原と同様に礫質の層が現れる。それらの層は、概ね褐色をしているが、測線 N3 の森林の土壌断面では、褐色層の下に赤褐色をした層があった。

一般に、泥炭層とその下に、溶脱を受けて石英が残留した灰白色の溶脱層、鉄やアルミニウムが集積した褐色の集積層が見られる土壌型は、泥炭ポドゾルである(永塚, 1997)。そのような土壌型は、登山道沿いの湿原の露頭で確認できた(写真 6)。測線上の土壌断面調査では溶脱層を識別することができなかったが、褐色の部分は、写真 6 の断面同様、上方で溶脱した成分の集積層であると解釈した。一方、N3 断面の最下層は、その土色から安山岩質溶岩が酸化的な環境で風化した状態を保持している層と解釈した。

小松原の測線 K でも、苗場山と同様の土壌断面が見られた(図 27)。すなわち、湿原では厚い泥炭層とその下方に褐色の礫層が、森林では表層に約 15 cm の腐植層とその下方に約 10 cm の泥炭層、褐色の礫層が現れた。ここでの褐色層も集積層であると解釈した。

3-2-3. 土層厚

測線 N1~N4 沿いの土層厚分布を図 28 にそれぞれ示した。

測線 N1 では、図の測線右端の湿原で土層が 60 cm 以上と最も厚くなっている。一方で、測線左端の湿原や、森林が分布する凸部の上方(測線長 25~30 m)では、土層が最も薄く 20 cm 程度になっている。ササ地が広がる斜面(測線長 7~22 m)の土層厚は 20~60 cm で、図の左に向かって土層が厚くなっている。

測線 N2 では、図の測線右端にあるササ地の土層厚が、測線長 32m 地点から 35m 地点に向かって厚くなり、厚さ 80 cm に達する。しかし、その先の地表の流路下では土層が 20 cm と薄くなる。これは流水によって土壌が侵食されたためだと考えられる。次に土層が厚いのは、ササ地が分布する斜面(測線長 22 m 地点)で厚さ 50 cm の土層が見られる。一方で、凸部に分布する森林の土層は 20~40 cm で薄い。湿原の土層は 20~50 cm で、図の左に向かって厚くなる。

測線 N3 では、測線長 21 m 地点のササ地で土層が最も薄く 18 cm である。また、最も厚い地点は図の測線右端のササ地で 66 cm である。湿原の土層厚は 40~65 cm で、測線左端の 2 地点で厚い。森林の土層厚は 35~53.5 cm で、図では右に向かって厚くなる。

測線 N4 では、図の測線左端にある湿原の中心の土層が最も厚く、60~80 cm の土層厚が見られる。また、湿原から森林に近づくにつれて徐々に土層が薄くなり、ササ地と森林の境界部（測線長 7~10 cm）では 20 cm 前後の土層厚しかない。森林の土層はやや厚く 20~35 cm である。

測線 K の土層厚は、苗場山の測線 N4 と同じ傾向が見られた（図 29）。湿原の土層は 60~100 cm で顕著に厚く、森林に向かって徐々に薄くなっていく。測線長 45 m 地点の森林の土層が最も薄く 21 cm で、森林の土層は 20~40 cm 程度である。また、森林と湿原の境界に分布する低木帯の土層は 40~60 cm で森林よりもやや厚い。

3-2-4. 積雪深分布

1) 苗場山

2017 年 5 月 21 日の空撮範囲におけるオルソ画像の中央部にほぼ平行に並ぶ 2 つの森林の列がある（図 30）。この森林は堤防状の微起伏の上部に分布している。この微起伏の斜面はササ地になっている。また、微起伏の下部の平坦面には湿原が広がっている。上述の 2 つの森林列の南縁では積雪が 1 m 以上ある一方、北縁では 1 m 以下になっている（図 31）。森林が微起伏の上部に分布しているため、2 つの森林列の南縁は冬季の季節風の風下にあたり、積雪が吹き溜まりやすくなっている。南側の森林列の風下側の一部には深さ 4~5 m の厚い積雪がある。一方、森林の立地する領域は積雪が浅くなっている。測線 N2 の断面形に残雪表面を重ねて表すと図 32 のようになる。森林の積雪深は 1 m 以下と薄い、風下側に分布するササ地と湿原には 2 m 以上の厚い積雪がある。

2) 小松原

図 33 に、測線 K の地形断面に 5 月中旬の残雪分布を重ねて示した。森林の中心部で積雪が最も浅く、その深さは約 50 cm である。中心部から外側に向かって積雪深が大きくなり、湿原では厚さ約 2 m 程度の積雪が見られた。

3-2-5. 表土の含水率

苗場山において、湿原の全ての測点（40 地点×2 時期）で、土壌含水率 100%を示した（図 34）。ほかに飽和していた土壌は 9 月のササ地の 2 地点のみで、一般にササ地と森林は湿原より表土が乾燥していた。ササ地と森林の土壌含水率を中央値と比較すると、9 月のササ地の土壌含水率は 43.5～74.5%であったが、森林は 26.5～35%であり、全ての測線においてササ地より森林の方が乾燥していた。10 月は測線 N1、N2 の土壌含水率がササ地で 45.5%、38.5%で、森林で 53.5%、58.5%であり、ササ地の方がやや乾燥していた。一方で、測線 N3、N4 では、ササ地で 62%、66.5%、森林で 43%、41%であり、森林の方が乾燥していた。またササ地と森林の土壌含水率の標準偏差に着目すると、10 月の測線 N2 を除いた全ての地点で、ササ地の標準偏差が 10.7～20.5%と大きく、森林は 10%未満であった。

苗場山と同様に、小松原の湿原の土壌含水率も 10 地点全て 100%であった（図 35）。一方、森林は中央値が約 50%で湿原よりも乾燥していた。また、森林の標準偏差は 11.3%で、苗場山の森林と同程度の値を示した。

3-2-6. 土壌水・地下水の分布

電気探査によって得られる地下の比抵抗構造は、鉱物や間隙率、飽和度、温度といっ

た多くの要因に左右される（島ほか, 1995）。しかし、3-2-2 で取り上げたように、本研究の対象地の土層構造は場所によらず共通しているため、地下 1m 程度に限定すれば、電気比抵抗は土壌の乾湿を反映していると考えられる。

測線 N2 下の比抵抗構造から、湿原の地下 1 m の比抵抗は $1024 \Omega\text{m}$ 以下と小さく、表土が飽和していたことから滞水していることが分かる（図 36）。一方、最も比抵抗が大きくなる ($>2048 \Omega\text{m}$) のは森林が分布する微起伏の頂点（測線長 24 m 地点）で、次にササ地の広がる斜面（測線長 18 m 地点前後）の比抵抗が $1475 \sim 2048 \Omega\text{m}$ で大きい。ササ地と森林を比較すると、森林の中心部（測線長 26 m 地点）では比抵抗が $1475 \Omega\text{m}$ 以下になっており、ササ地の方が乾燥している。また地下 1 m 以深の比抵抗は、ササ地と森林ではほぼ $8192 \Omega\text{m}$ 以下であるのに対し、湿原では深さ 2 m より下が $8192 \Omega\text{m}$ 以上と高い値を示す。

測線 N3 では、測線 N2 と同様に湿原の比抵抗が $1024 \Omega\text{m}$ 以下で最も小さく、湿原とササ地の境界（測線長 15 m 地点）付近の比抵抗も $1024 \Omega\text{m}$ 以下になっている（図 37）。また、比抵抗が最も大きいのは、森林が分布する微起伏の頂点（測線長 25 m 地点）付近とササ地が広がる斜面の傾斜変換点（測線長 18 m 地点）で、比抵抗が $1475 \sim 2048 \Omega\text{m}$ である。ササ地の比抵抗は $1475 \Omega\text{m}$ 以下と小さく、森林に比べて湿潤である。また地下 2 m 以深の比抵抗は、湿原が広がる測線長 15 m 地点までと微起伏の凸部周辺（測線長 20 ~ 26 m）で $4096 \Omega\text{m}$ 以上と大きく、ササ地が広がる斜面の一部（測線長 15 ~ 20 m）で $4096 \Omega\text{m}$ 以下であった。

測線 K では、湿原の地下 1 m の比抵抗が $512 \Omega\text{m}$ 以下で最も小さく、表土が飽和していたことから滞水していることが分かる（図 38）。湿原と森林は地形的な差がほとんど見られないが、森林の比抵抗は $737 \Omega\text{m}$ 以上で湿原より乾燥している。しかし、苗場山の 2 測線に比べると森林の比抵抗は小さい値を示している。また地下 2 m 以深では、ど

の植生の比抵抗も $2048\ \Omega\text{m}$ 以上であり差がないが、森林の一部（測線長 20～25 m）と
湿原の一部（測線長 13～17m）で $2887\ \Omega\text{m}$ 以上の大きな値を示す。

第4章 考察

4-1. 植生と地形、積雪深、土壌水分の関係

3つの地形量に対する植生ごとの傾向から、指交関係が顕著に見られる苗場山山頂付近の植生は、それぞれ地形的に異なる立地に成立していることが分かった(図 39)。具体的には、まず森林は風上にあたる西側の斜面に優先し(図 22)、また微起伏の頂点を占め(図 24)、湿原に比べると正の曲率が大きなところに成立していた(図 20)。一方、湿原は緩傾斜で平滑な場所に出現し(図 18, 20)、冬季季節風に対しては風下に当たる南東側や、森林の少ない南側で優先した(図 22)。ササ地は全斜面の方位分布にほぼ等しく分布するが、森林と比べれば湿原に類似した分布パターンを示した(図 22)。その一方、傾斜や曲率は森林に類似し、湿原より傾斜が大きく、正の曲率が大きい場所に立地した(図 18, 20)。積雪深は微起伏による斜面方位の差に対応しており、風下側にあるササ地と湿原で1m以上と大きく、風上側にある森林で小さかった(図 31, 32)。一方、表土の含水率は、微起伏による斜面の曲率の差に対応し、湿原では秋季でも飽和状態にあり、ササ地と森林では湿原より乾燥していた(図 34)。また測線 N2、N3 とも湿原の比抵抗が最も小さく、土層全体が滞水していることを示唆する一方、ササ地と森林は湿原よりも比抵抗が大きく相対的に乾燥していた(図 36, 37)。

一方、指交関係がほとんどない小松原の湿原と森林は、苗場山と異なる地形的立地に成立していた。具体的には、湿原は苗場山より緩傾斜で平滑な場所に出現する割合が高く(図 19, 21)、方位に関しては北向きの斜面を占める割合が高かった(図 23)。森林は苗場山と同様に、傾斜と曲率が湿原より大きい場所に立地していたが(図 19, 21)、方位ごとの出現割合の偏りは見られなかった(図 23)。

4-2. 指交関係の成立要因

図 39 のように各植生に棲み分けが生じているのは、微起伏によって、植物の生育を直接規定する積雪深分布と土壤水分の差ができ、植物の生育適地が決定されているためと考えられる。このことは次のように説明できると考えた (図 40)。

①風上側にある凸状の斜面では、冬季に積雪が吹き払われやすいため、積雪が浅く周囲に比べて融雪が早い。そのため、その場所では植物の生育期間が最も長い。また秋季には、凸状の地形のために排水されやすく、表土と地下ともに乾燥するため樹木の生育適地になる。

②風下側にある凸状の斜面では、積雪が厚く吹き溜まり、初夏まで積雪が残る。それゆえ植物の生育期間は短縮されるが、凸状の地形では融雪水が排水されやすいため、秋季には乾燥する。風上側と異なり生育期間が短いために樹木は成立できずササ地となる。なお、ササ地では土壤含水率の標準偏差が 1 つの例外を除き 10~20%であり、それが 10%以下の森林に比べて大きかった (図 34)。これは、湿原との境界付近の測定値が高い値を示したためである。ササは地下茎によって土壤の酸素条件の良好な地域から酸素を供給できるため、酸素条件が悪い地域でも成立することができる (高桑・伊藤, 1986)。そのため、斜面の遷緩線 (曲率は凹型) もササの生育適地になる。

③風下側にある平坦面でも、積雪が厚く吹き溜まる。厚い積雪は初夏遅くまで残るため、植物の生育期間が短縮される。初夏には多量の融雪水が凸部から供給され、平坦な地形ゆえの滞水も相まって湿潤な状態が保持される。このような嫌氣的土壤には、湿性を好み、短い期間でも生育が可能な草本植物のみが育つ。湿原のもとで、植物遺体は未分解なまま堆積し泥炭となっている (図 26) のも、嫌氣的で微生物の活動が抑えられるためと考えられる (阪口, 1974)。したがって風下側の平坦面は湿原が分布する。

苗場山の山頂付近では、そうした堤防状の微起伏が何列も連続するために、湿原と森

林の生育適地が交互に現れ、指交関係が成立している。

4-3. 微起伏の有無と指交関係

ここまで、微起伏が指交関係を成立させると論じてきたが、苗場山の測線 N4 と小松原の測線 K のように、湿原と森林の間に地形的な差がないにもかかわらず、指交関係を示す場所もあった。この節では、そうした場所がある理由について検討する。

N4 と K の 2 測線においては、湿原の土層がササ地や森林に比べて顕著に厚い (図 28d, 29)。苗場山のような山地の湿原は基盤の起伏を泥炭が覆うことがあり、ブランケット泥炭地と呼ばれる (山根ほか, 1978)。測線 N4 と K の土層断面は、このブランケット泥炭地の形成によって元の微起伏が平坦化しているものだと考えられる。そうした場所では、森林と湿原の間に地形的な差が無くなった現在も、過去に微起伏上に森林が侵入・定着したものが残存し、指交関係が成立しているのであろう。

さらに森林と湿原の間に地形的な差がなくても森林の方が、積雪が浅くなることが分かった (図 33)。これは森林が存在すると、降雪が地面に到達する前に樹冠に付着し、雪が消失する降雪遮断が生じるためである (鈴木ほか, 2006)。また、表土の含水率や電気比抵抗は、森林と湿原の間に地形的な差がなくても森林の方が乾燥することを示した (図 35, 38)。これは森林の成立によって形成される腐植層が、泥炭に比べて排水性が良いためであると考えられる。そうした効果があるため、泥炭が堆積して湿原との地形的な差が無くなった現在も、森林の生育適地が保持され、指交関係を残存させていると考えられる。

4.4. 湿原の発達史と指交関係

苗場山の山頂緩斜面の低標高側 (図 8) の湿原や、小松原 (図 9) では、指交関係は不

明瞭であった。そこで最後に、この差異が生じる理由について考察する。

苗場山や小松原では、後氷期に入り、急激な温暖化に伴い積雪量が増大したため、湿原が形成されたと考えられている（卜部・片岡, 2013）。湿原の形成以前には、より寒冷乾燥な条件のもと、泥炭の下に観察された砂礫の斜面が広がっていたと考えられる。また、観察したササ地と森林のいずれの土壌断面でも、表土（腐植層）の下に泥炭が見られた（図 26, 27）。このことは、かつて湿原は現在よりも広範囲に広がっており、後に湿原内にササ地や森林が定着・侵入したことを示唆している。苗場山では約 3500 年前頃の気候の冷涼化に伴い、オオシラビソを主体とした森林の垂直分布帯が上昇した（安田・三好, 1998）。そのため、苗場山山頂付近と比べて、苗場山の低標高域や小松原では森林の侵入時期が早かったと考えられる。さらに、標高が低いほど年平均気温が高く、積雪の消失時期が早くなる。そのため湿原が乾燥化しやすく、このようなところに森林が侵入し、広範囲に広がったため、現在では明瞭な指交関係が見られなくなったのではないかと考えられた。

第5章 結論

苗場山と小松原の湿原を対象に、湿原と森林の指交関係の成因を明らかにするために、GISによる地形量の解析と、積雪深分布、土壌水分、土層構造に関する現地調査を行った結果、以下のことが分かった。

(1) 火山性の微起伏によって、3つの異なる地形的立地ができ、それぞれの立地で積雪深と土壌水分に差が生じた。風上側の凸状の斜面は、冬季の積雪が浅く、秋季に湛水せず、森林が成立する。風下側の凸状の斜面は、冬季の積雪が厚く、秋季に湛水せず、ササ地が成立する。風下側の平坦地は、冬季の積雪が厚く、秋季に湛水し、湿原が成立する。苗場山では山頂の緩斜面上にそうした堤防状の微起伏が何列も連続するため、湿原と森林の生育適地が交互に現れ、指交関係が成立していた。

(2) 指交関係の成立には微起伏の存在が不可欠であるが、苗場山と小松原の一部には微起伏のない平坦地で指交関係が成立している箇所があった。そうした湿原の土層は周囲に比べて顕著に厚く、これらの地点では過去に存在していた微起伏が泥炭によって埋没していることが分かった。すなわち、微起伏上に森林が成立した後に、泥炭が厚くなっていき微起伏が埋没したところに指交関係が残存している。また、湿原と森林の間に地形的な差が無くなった現在も、森林が降雪を遮断する効果によって積雪が浅くなり、腐植層が形成されるために湿原よりも土壌が乾燥し、森林の生育適地が保持されていた。

(3) 苗場山の低標高域や小松原では、指交関係が明瞭ではなかった。これは、後氷期初期の多雪化やその後の冷涼化という過去の気候変動に対応して、苗場山山頂付近に比べて、早い時期から森林の侵入・定着が始まっていたことと、標高が低く融雪の時期が早いため湿原が乾燥化しやすく、森林が侵入しやすかったことが原因ではないかと考えられた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員の池田敦先生には、現地調査から卒業論文の執筆まで終始ご指導いただいた。筑波大学地形学分野の諸先生方には、演習や発表会等で研究内容を議論していただいた。また、地形学分野の大学院生の今村友則氏、4年生の吉原直志氏には、現地調査を手伝っていただいた。苗場山山頂自然体経験交流センターの管理人の方々には、大変お世話になった。最後に、地形学分野の4年生とは、お互いに励ましあいながら研究を進めることができた。以上の皆様に心から感謝いたします。

本研究は苗場山麓ジオパーク学術研究奨励事業の助成のもと行われた。現地調査は、林野庁中越森林管理署および中部森林管理署を通じて、入林許可を取得して行った。またGIS解析には、国土地理院応用地理部にご提供いただいた航空レーザ測量成果を使用した。関係機関の方々にも感謝いたします。

引用文献

- 石沢 進 (2003) : 「花かおる苗場山」 . ほおずき書籍.
- 石塚和雄 (1977) : 「植物生態学講座 1 群落の分布と環境」 . 朝倉書店.
- ト部厚志・片岡香子 (2013) : 苗場山山頂の湿原堆積物に挟在するテフラ層. 第四紀研究, 52, 241-254.
- 叶内敦子 (1987) : 鬼怒沼湿原堆積物の花粉分析. 第四紀研究, 26, 147-153.
- 叶内敦子 (1991) : 関東地方北部山地における後氷期温暖期以降の森林植生の変遷. 駿台史学, 105, 19-50.
- 菊池多賀夫 (2001) : 「地形植生誌」 . 東京大学出版会.
- 小泉武栄 (1974) : 木曾駒ヶ岳高山帯の自然景観 : とくに, 植生と構造土について. 日本生態学会誌, 24, 78-91.
- 阪口 豊 (1974) : 「泥炭地の地学」 . 東京大学出版会.
- 柴田 治 (1985) : 「高地植物学」 . 内田老鶴圃.
- 島 祐雅・梶間和彦・神谷英樹 (1995) : 「建設・防災・環境のための新しい電気探査法」 . 古今書院.
- 島津光夫・立石雅昭 (1993) : 苗場山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) , 地質調査所.
- 鈴木知良・山崎 剛・太田岳史 (2006) : 森林帯での積雪過程. 雪氷, 86, 589-598.
- 高桑 純・伊藤浩司 (1986) : 湿原におけるササの生態的動向. 北海道大学大学院環境科学研究科邦文紀要, 2, 47-65.
- 高橋信幸 (1992) : 大雪山における湿原の成立. 季刊地理学, 44, 1-17.
- 永塚鎮男 (1997) : 「原色日本土壌生態図鑑」 . フジ・テクノシステム.

- 水野一晴 (1986) : 大雪山南部・トムラウシ山周辺の溶岩台地上における高山植物群落の立地条件. 地理学評論, 59A, 449-469.
- 水野一晴 (1990) : 北アルプスのカールにおける植物群落の分布と環境要因との関係. 地理学評論, 63A, 127-153.
- 守田益宗 (1985) : 暑寒別岳雨竜沼湿原の花粉分析的研究. 東北地理, 37, 166-172.
- 山中三男 (1963) : 南八甲田山二三湿原の花粉分析的研究. 日本生態学会誌, 13, 248-251.
- 山根一郎・松井 健・入沢周作・岡崎正規・細野 衛 (1978) : 「図説 日本の土壌」. 朝倉書店.
- 横山秀司 (2002) : 「景観の分析と保護のための地生態学入門」. 古今書院.
- 安田正次・沖津 進 (2006) : 上越国境地平ヶ岳における湿原の分布要因. 地理学評論, 87, 1-16.
- 安田喜憲・三好教夫 (1998) : 「図説日本列島植生史」. 朝倉書店.
- 渡辺悌二 (1986) : 立山, 内蔵助カールの植生景観と環境要因. 地理学評論, 59, 404-425.

植生帯	判読基準
I. 湿原	茶色でマット状。黒色で楕円形の池が多数みられる。
II. ササ地	薄い緑色でマット状。
III. 森林	やや濃い緑色の点群が密集している。マット状のササ地と区分できる。
IV. 裸地	白色の岩や山小屋周辺

表 1. 空中写真を用いた植生の判読基準

山小屋のある地点は裸地に含めた。

地点番号	緯度	経度	GPS標高 (m)	実測積雪深 (m)	GPS標高-実測積雪深 (m)	DEM標高 (m)	誤差 (m)	実測積雪深+DEM標高 (m)
1	138.6862631	36.84118357	2085.22	0.79	2084.43	2076.0	8.43	2076.79
2	138.6852549	36.84059235	2071.11	1.84	2069.27	2065.8	3.47	2067.64
3	138.6841733	36.84013924	2065.03	1.77	2063.26	2060.2	3.06	2061.97
4	138.6835219	36.84081102	2062.33	0	2062.33	2060.7	1.63	2060.70
5	138.6849023	36.8414239	2077.13	1.18	2075.95	2076.0	-0.05	2077.18
6	138.6856688	36.84186357	2092.74	1.57	2091.17	2090.7	0.47	2092.27
7	138.685296	36.841511		0		2080.3		2080.30
8	138.68403	36.841065		0		2065.5		2065.50

表 2 空中写真測量の地上基準点データ

地点 1～6 の緯度・経度と GPS 標高はデファレンシャル GPS を用いて現地で計測した。

地点 7・8 の緯度・経度と DEM 標高は、国土地理院のウェブサイト上の地理院地図から引用した。

誤差は、GPS 標高から実測積雪深と DEM 標高を引いた値を示す。

地点番号	緯度	経度	実測積雪深(cm)
1	36.8897999	138.6744183	202
2	36.88978028	138.6743653	216
3	36.88976245	138.6742819	240
4	36.88973613	138.6742341	204
5	36.88974587	138.6741614	130
6	36.88975289	138.6741053	58
7	36.88973186	138.6740561	176
8	36.88973819	138.67403	239
9	36.88972348	138.6739778	171
10	36.88970892	138.6739181	133

表 3 測線 K における積雪深測定地点データ

緯度・経度はデファイレンシャル GPS を用いて現地で計測した。

	湿原	ササ地	森林	裸地	全体
セル数	30004	46105	181975	599	258683
全体 面積(km ²)	0.75	1.15	4.55	0.015	6.47
割合(%)	11.6	17.8	70.3	0.2	100
セル数	18007	20032	27089	599	65727
GIS解析範囲 面積(km ²)	0.45	0.5	0.68	0.01	1.64
割合(%)	27.4	30.5	41.2	0.9	100

表 4 苗場山の各植生の面積

1つのセルのサイズは5m×5mである。

	湿原	ササ地	森林	裸地	全体
セル数	3236	0	230650	0	233886
全体					
面積(km ²)	0.08	0	5.77	0	5.85
割合(%)	1.4	0	98.6	0	100
セル数	1499	0	10440	0	11939
GIS解析範囲					
面積(km ²)	0.04	0	0.26	0	0.30
割合(%)	12.6	0	87.4	0	100

表 5 小松原の各植生の面積

1つのセルのサイズは5m×5mである。

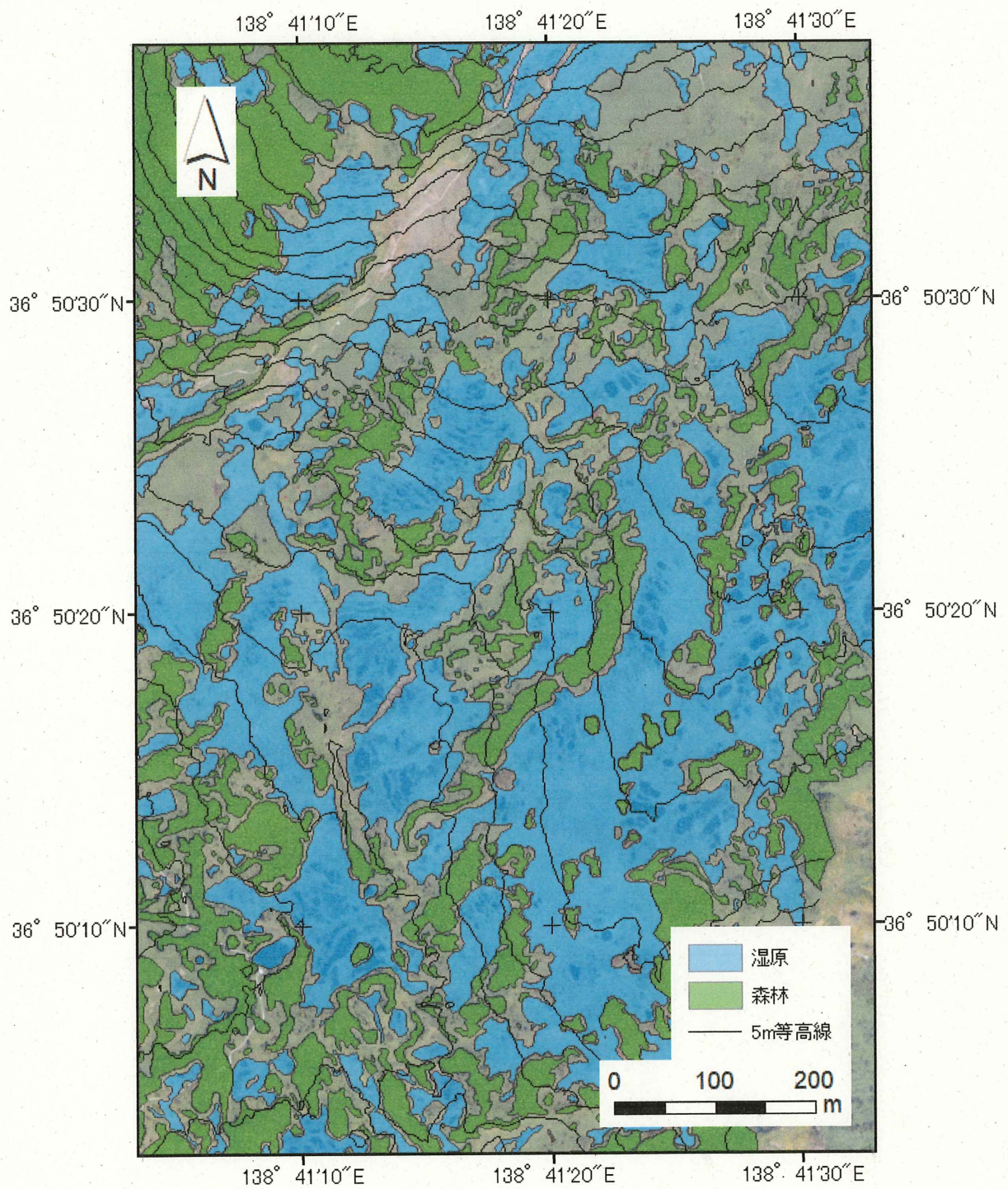


図1 苗場山山頂部における湿原と森林の指交関係の例

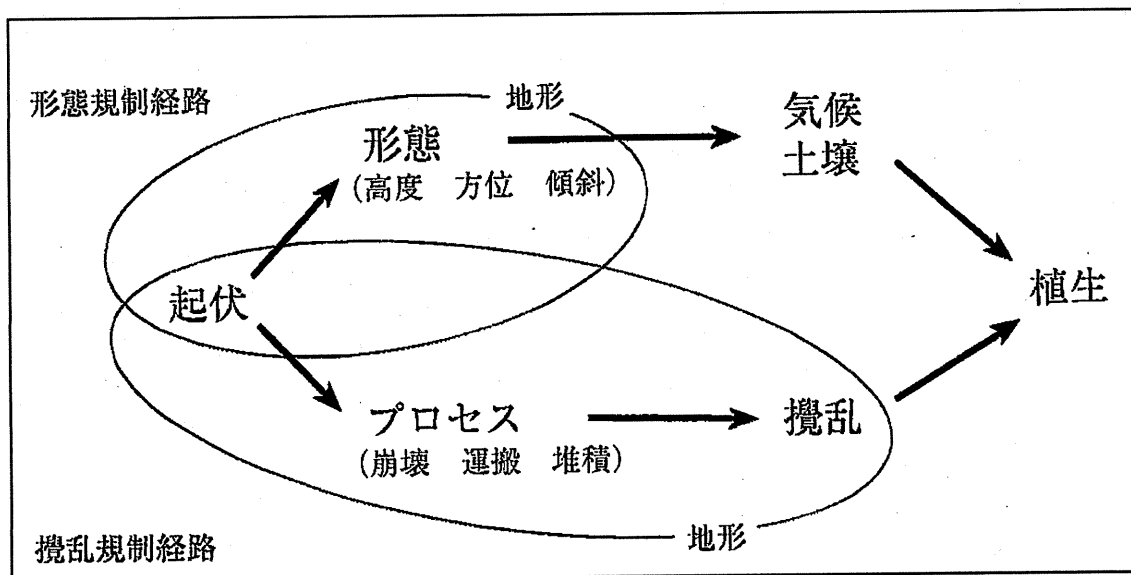


図2 菊池 (2001) による概念図

地形因子が植生に作用する二つの経路



図3 苗場山の位置

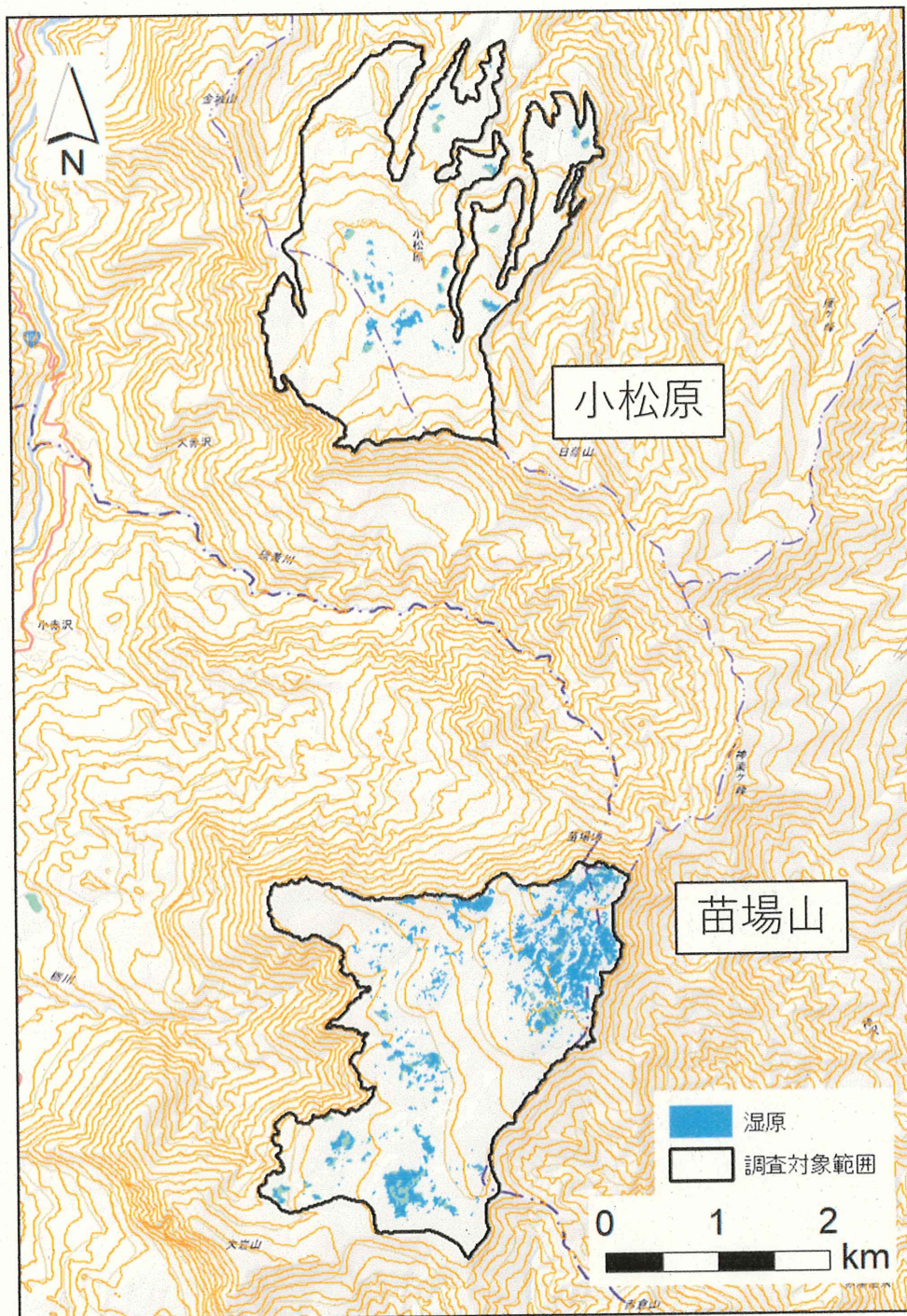


図4 苗場山地域の地形図と湿原の分布

黒枠が本研究の対象にした苗場山と小松原の火山性緩斜面の範囲を示している。

等高線は50m 間隔で示している。

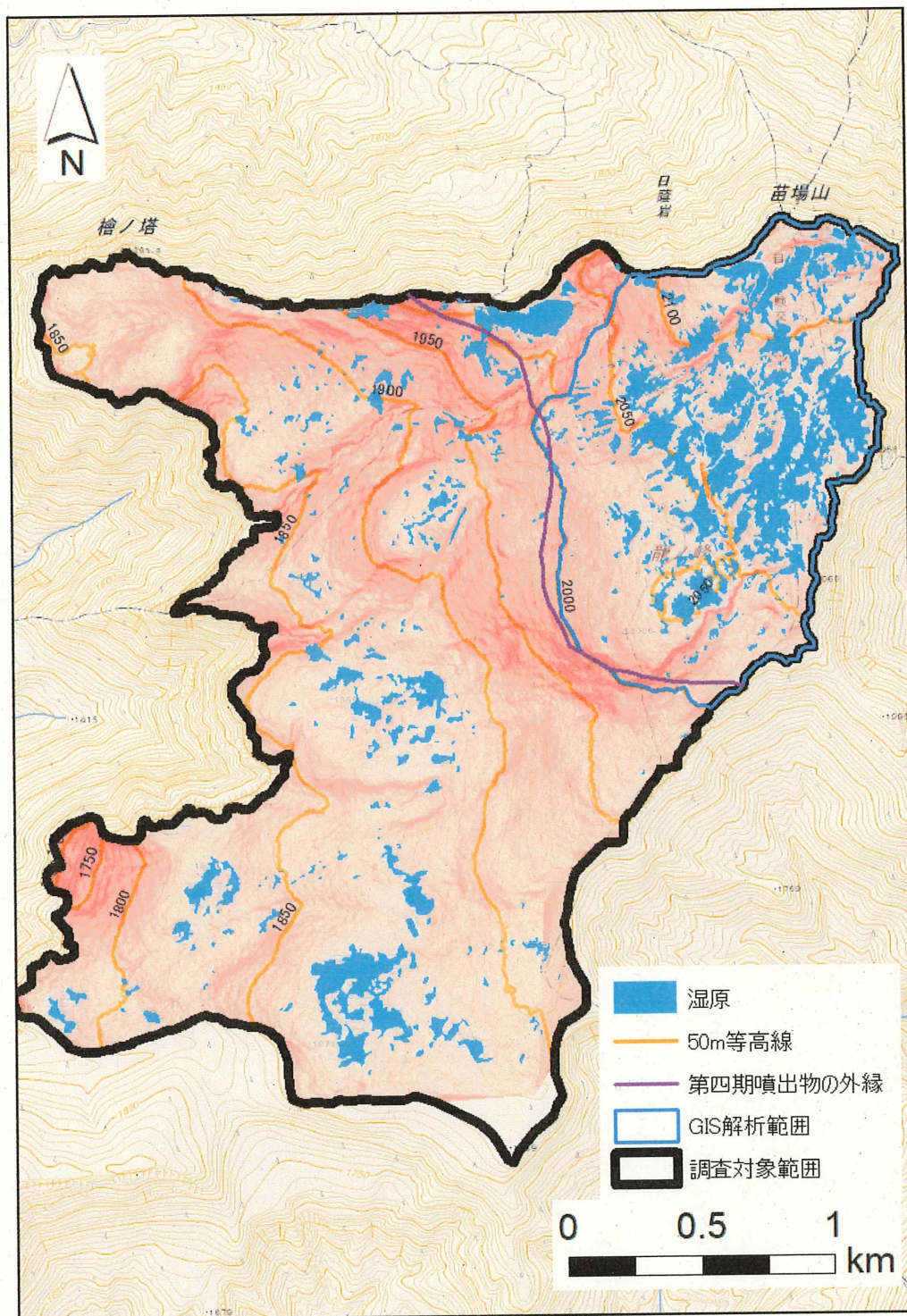


図5 苗場山の地形図

傾斜量図を透過表示させて地形を強調している。

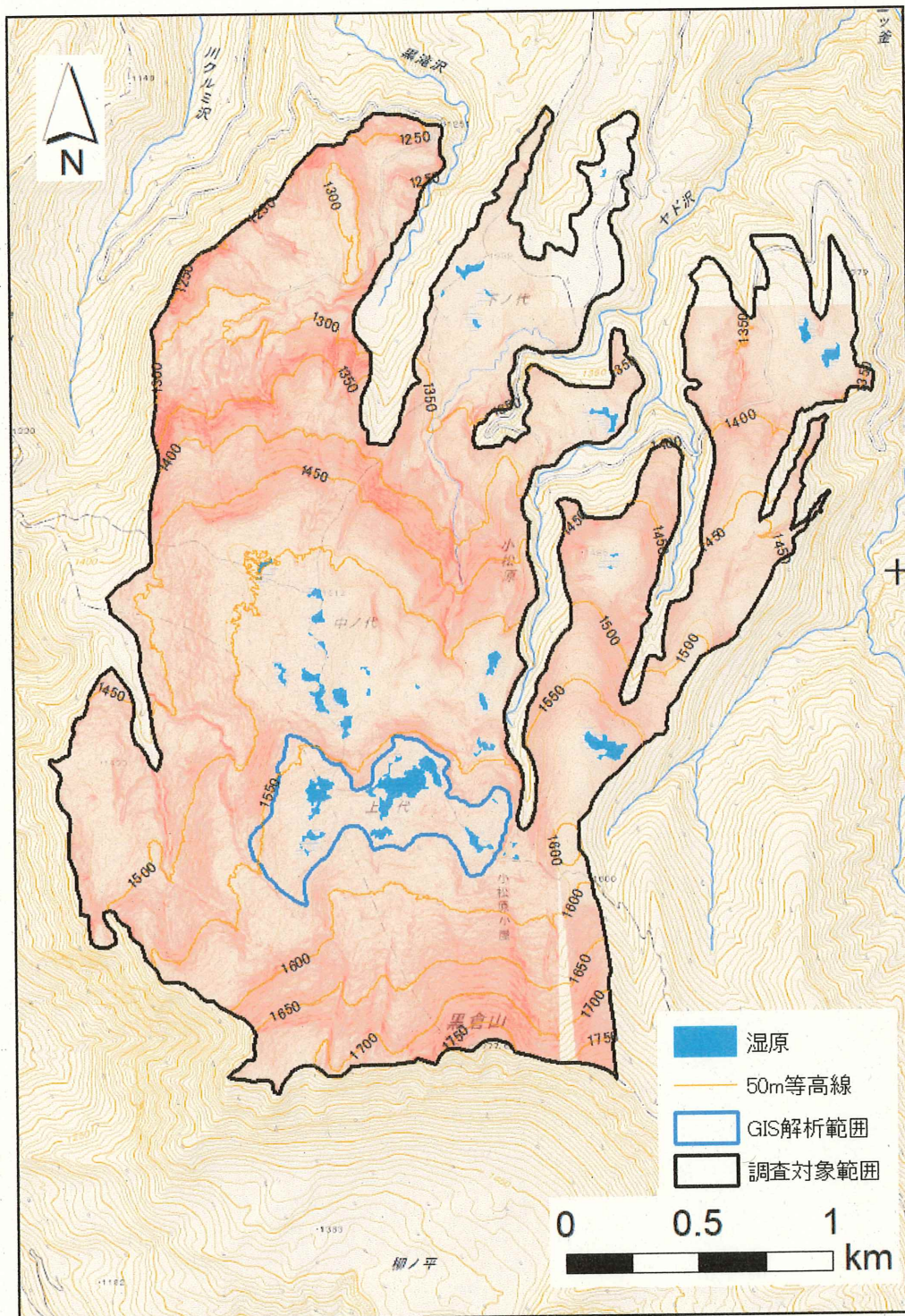


図 6 小松原の地形図

傾斜量図を透過表示させて地形を強調している。

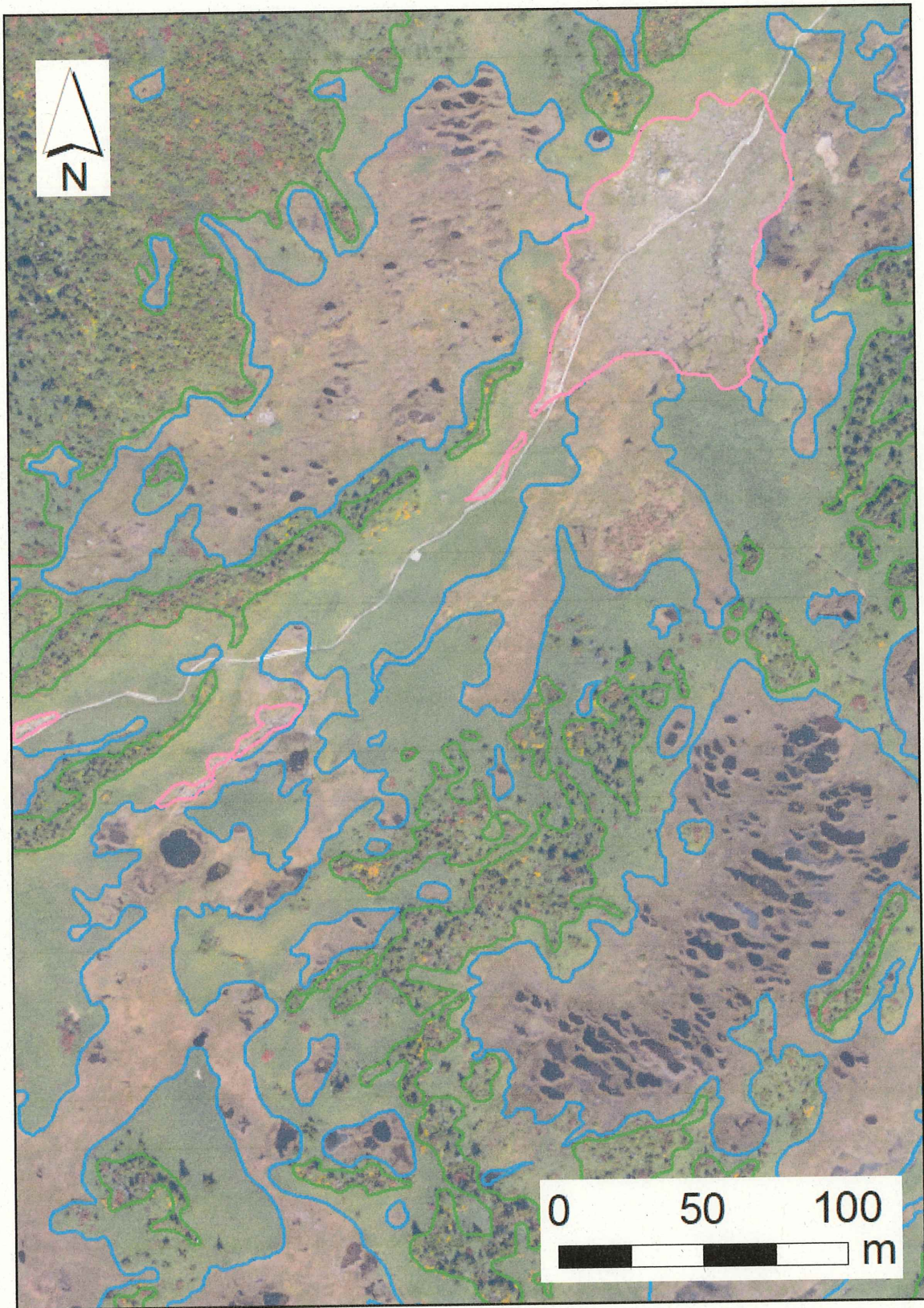


図7 植生境界の判読例

青色の枠線内が湿原、緑色の枠線内が森林、ピンク色の枠線内が裸地、それ以外をササ地と判読している。

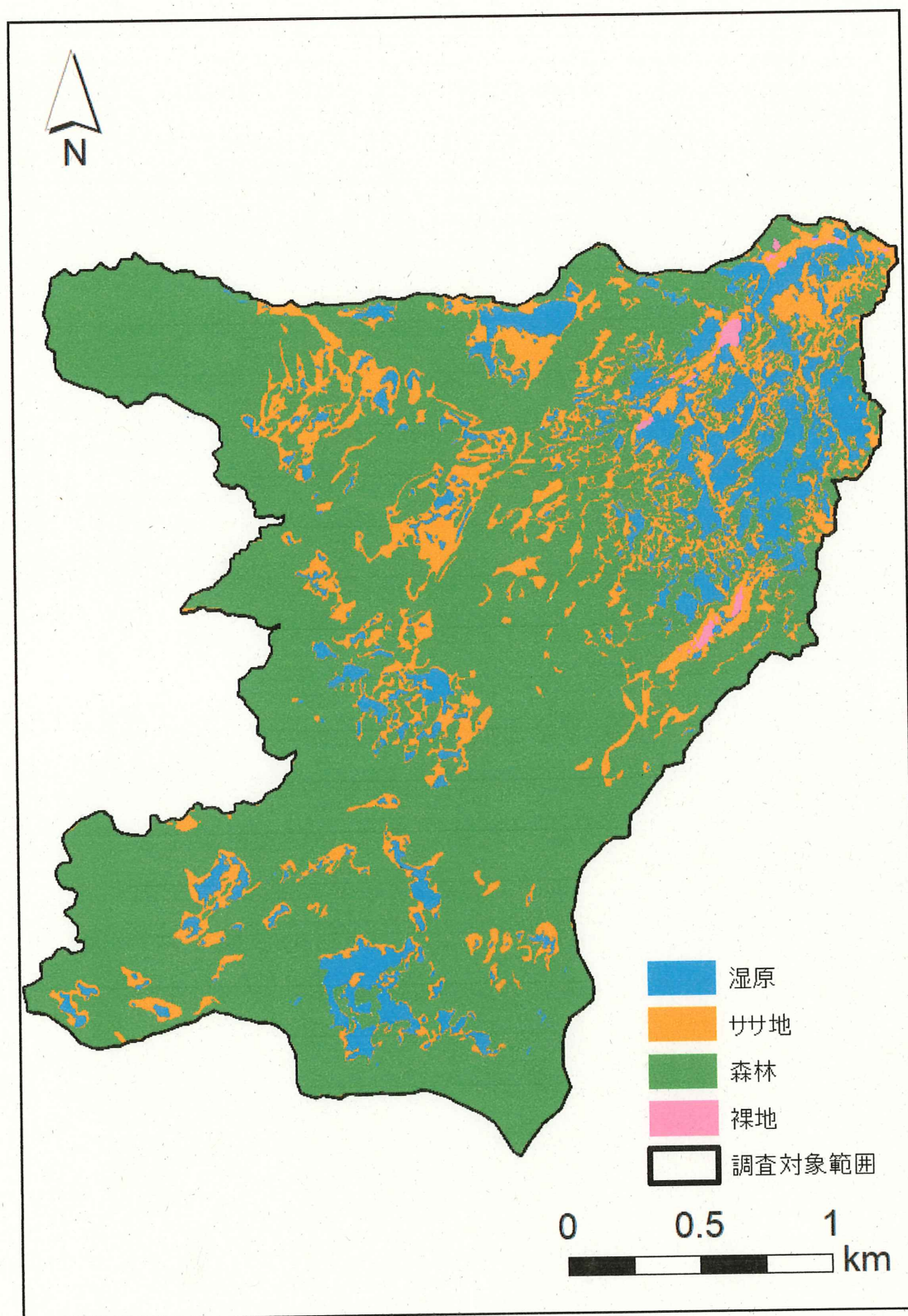


図 8 苗場山の総観植生

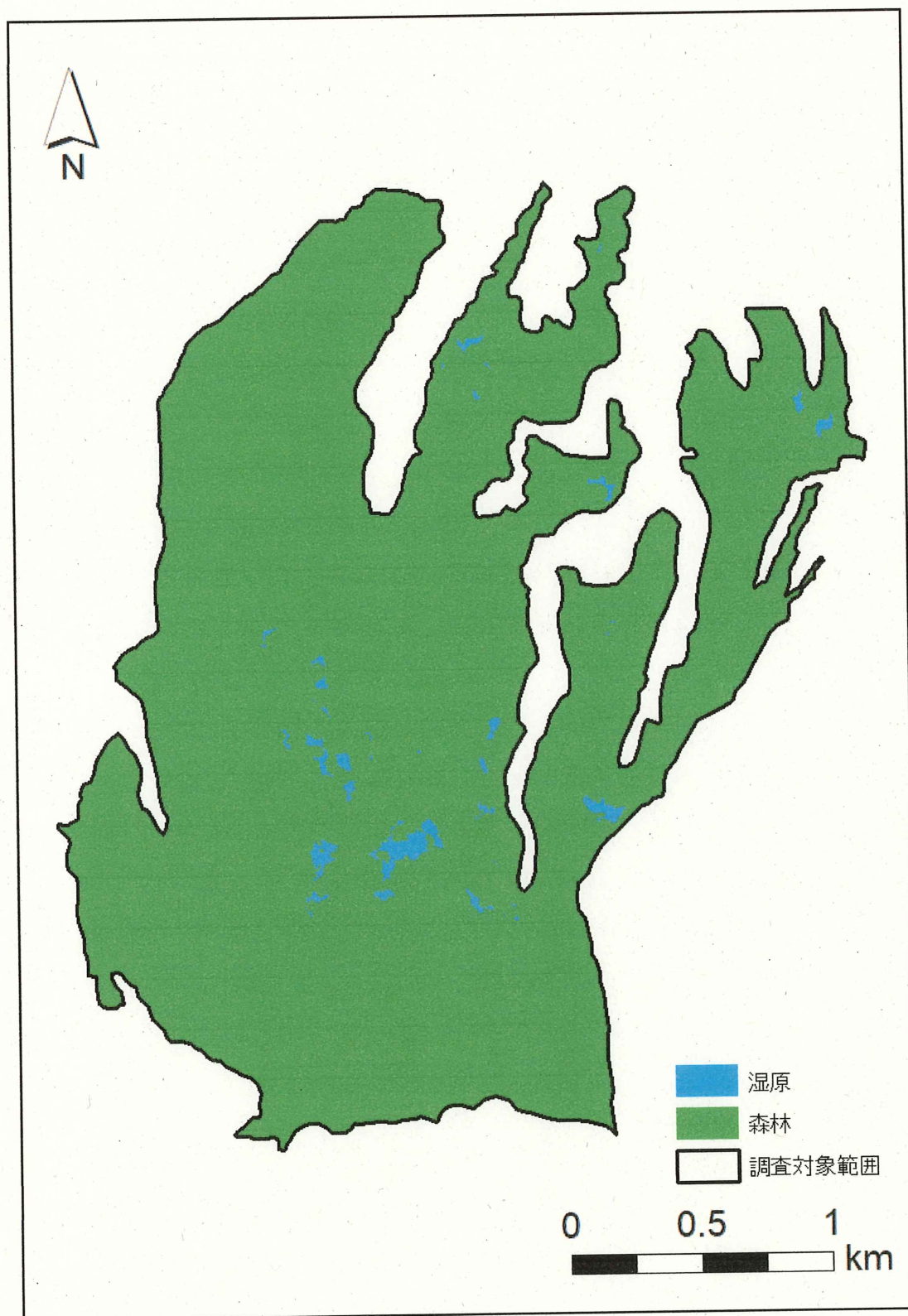


図9 小松原の総観植生

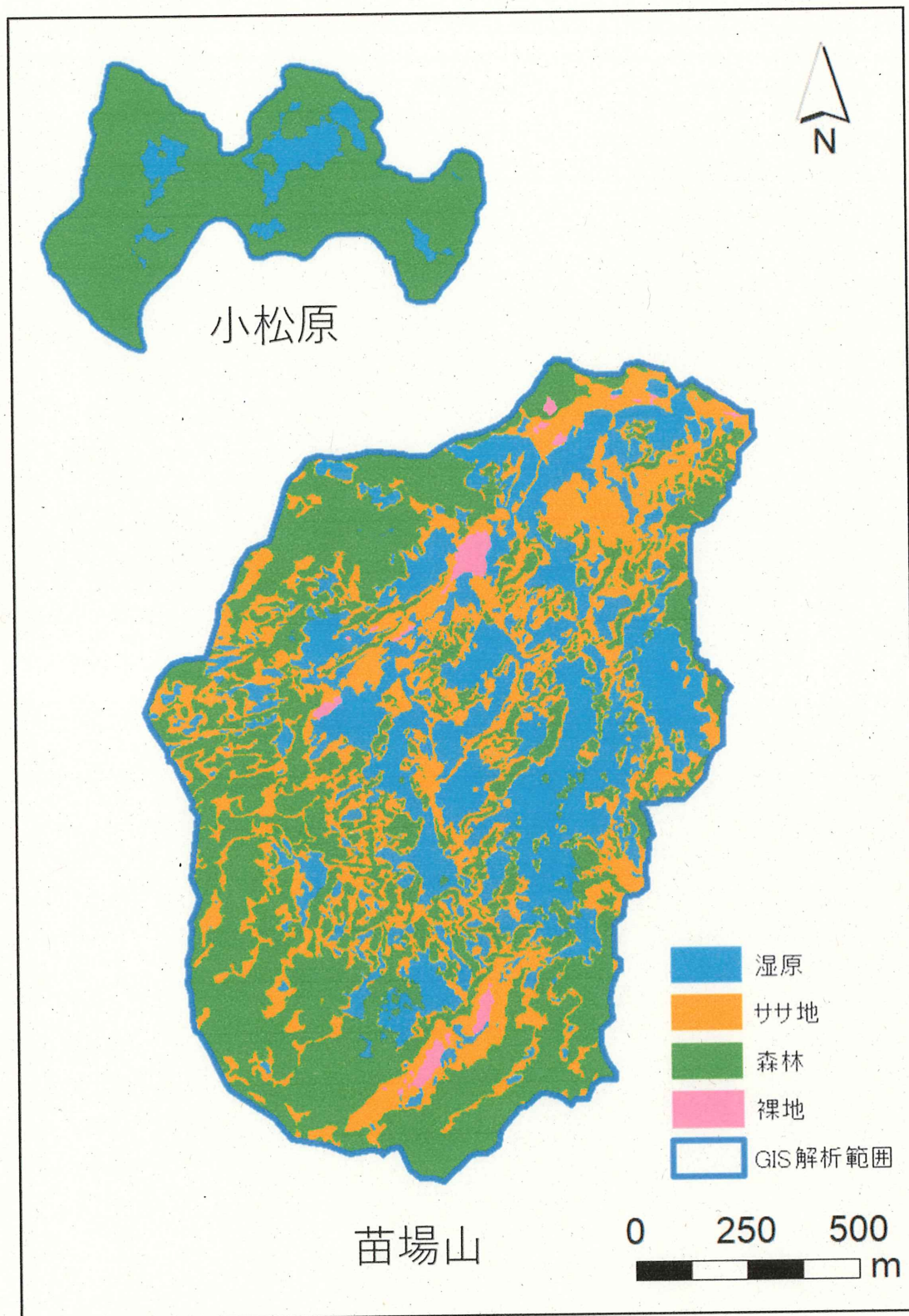


図 10 苗場山山頂部と小松原の GIS 解析範囲における総観植生

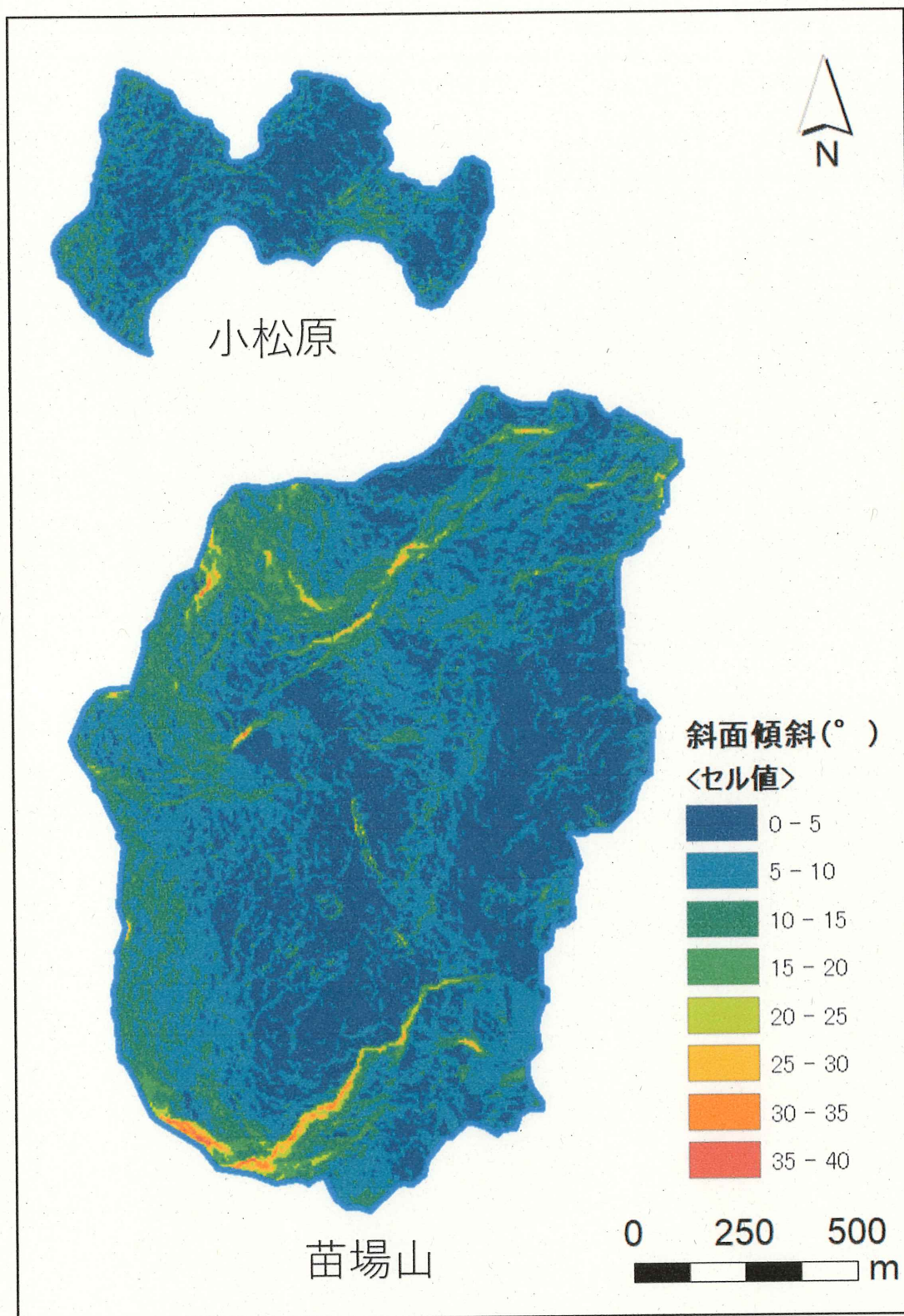


図 11 GIS 解析範囲の斜面傾斜

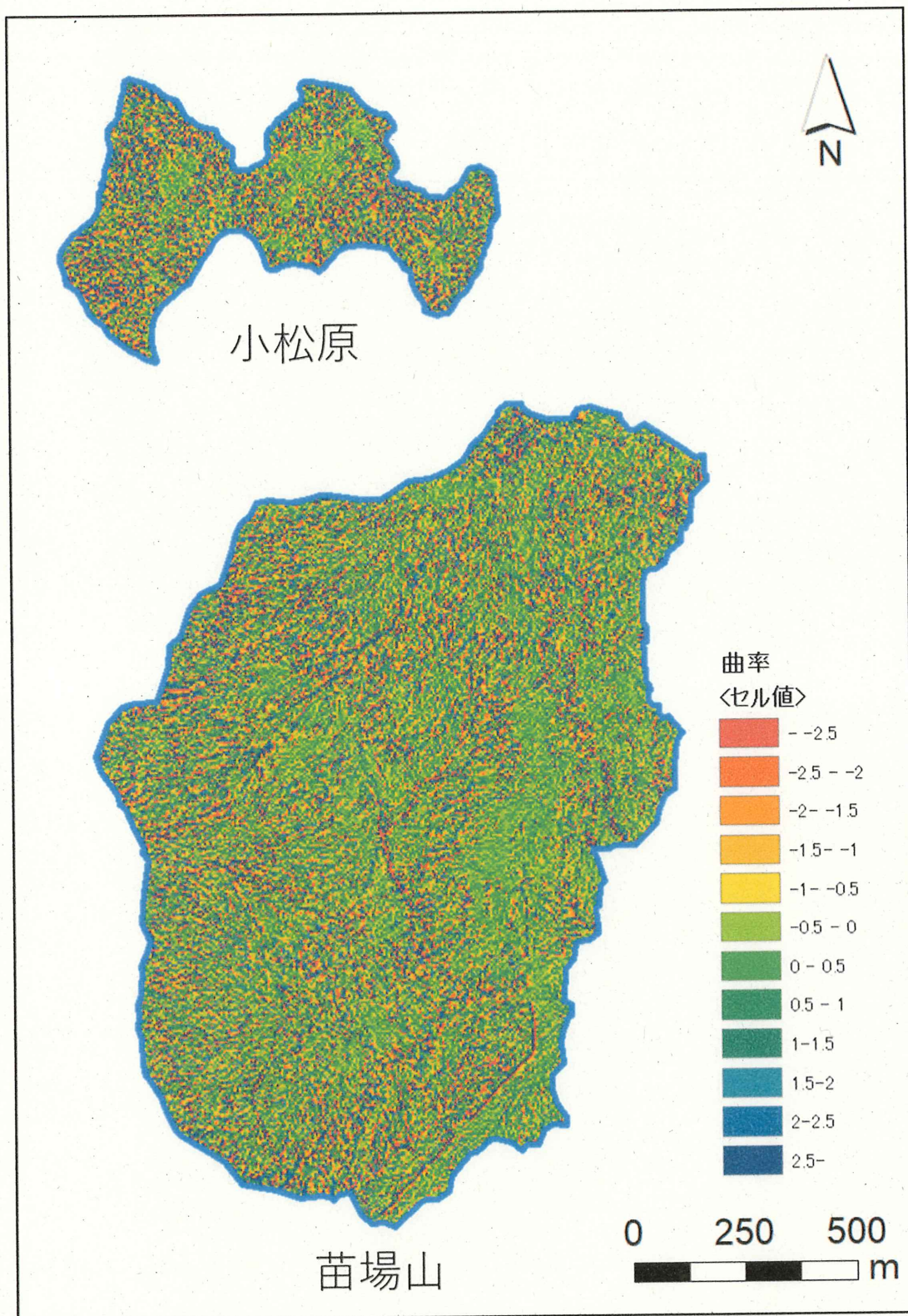


図 12 GIS 解析範囲の曲率

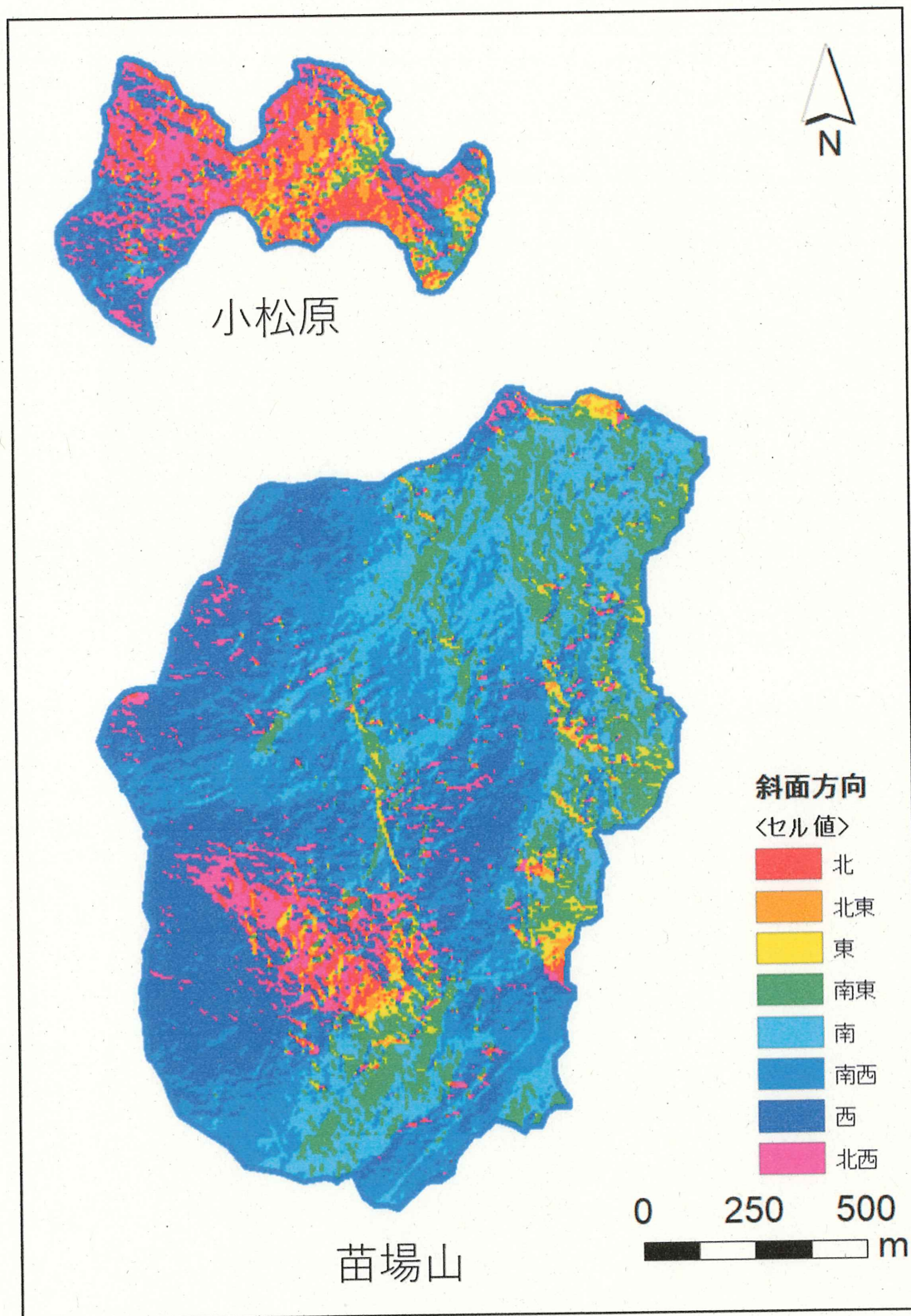


図 13 GIS 解析範囲の斜面方位

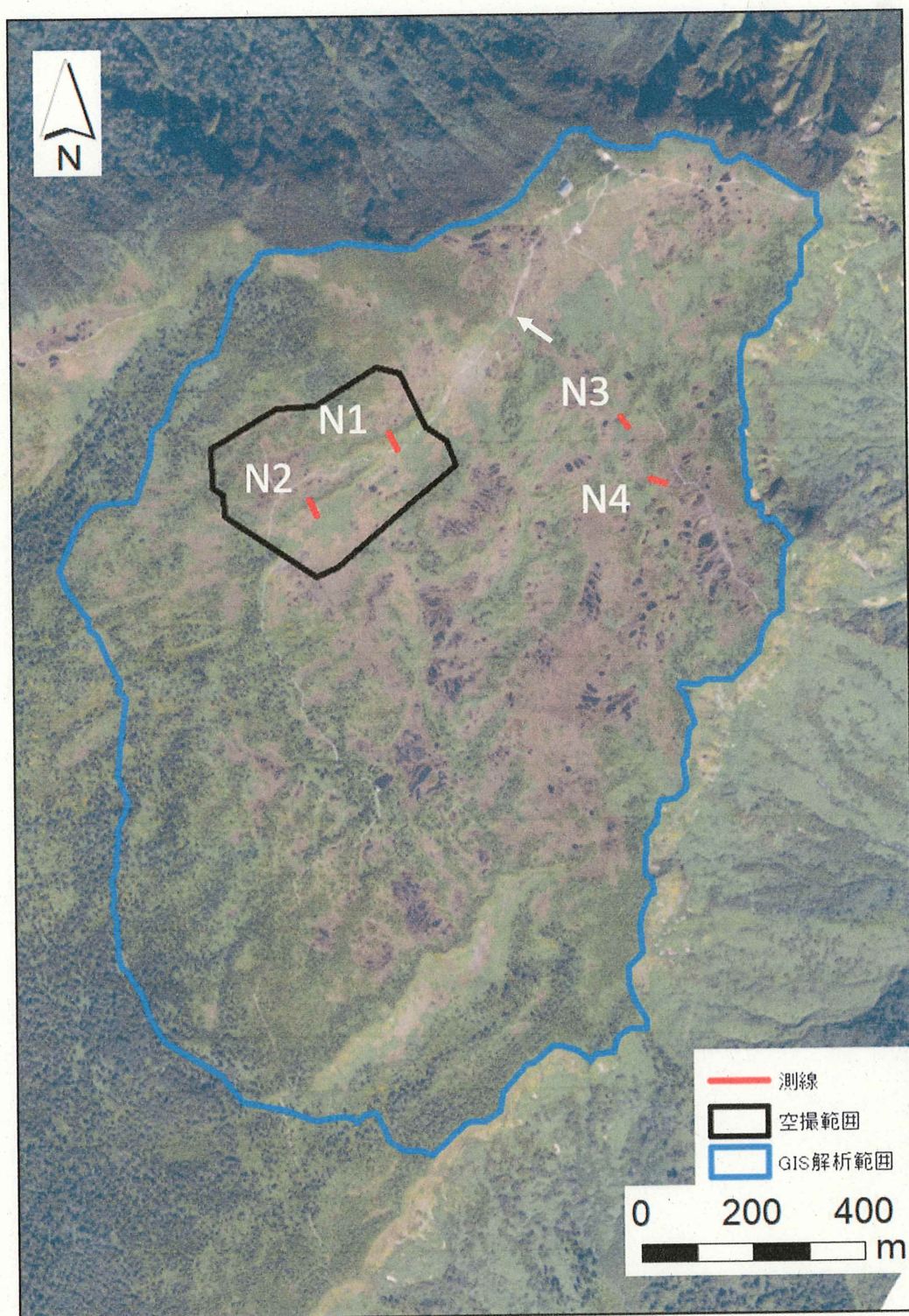


図 14 苗場山山頂部の現地調査地点
矢印は写真 6 の撮影地点を示している。

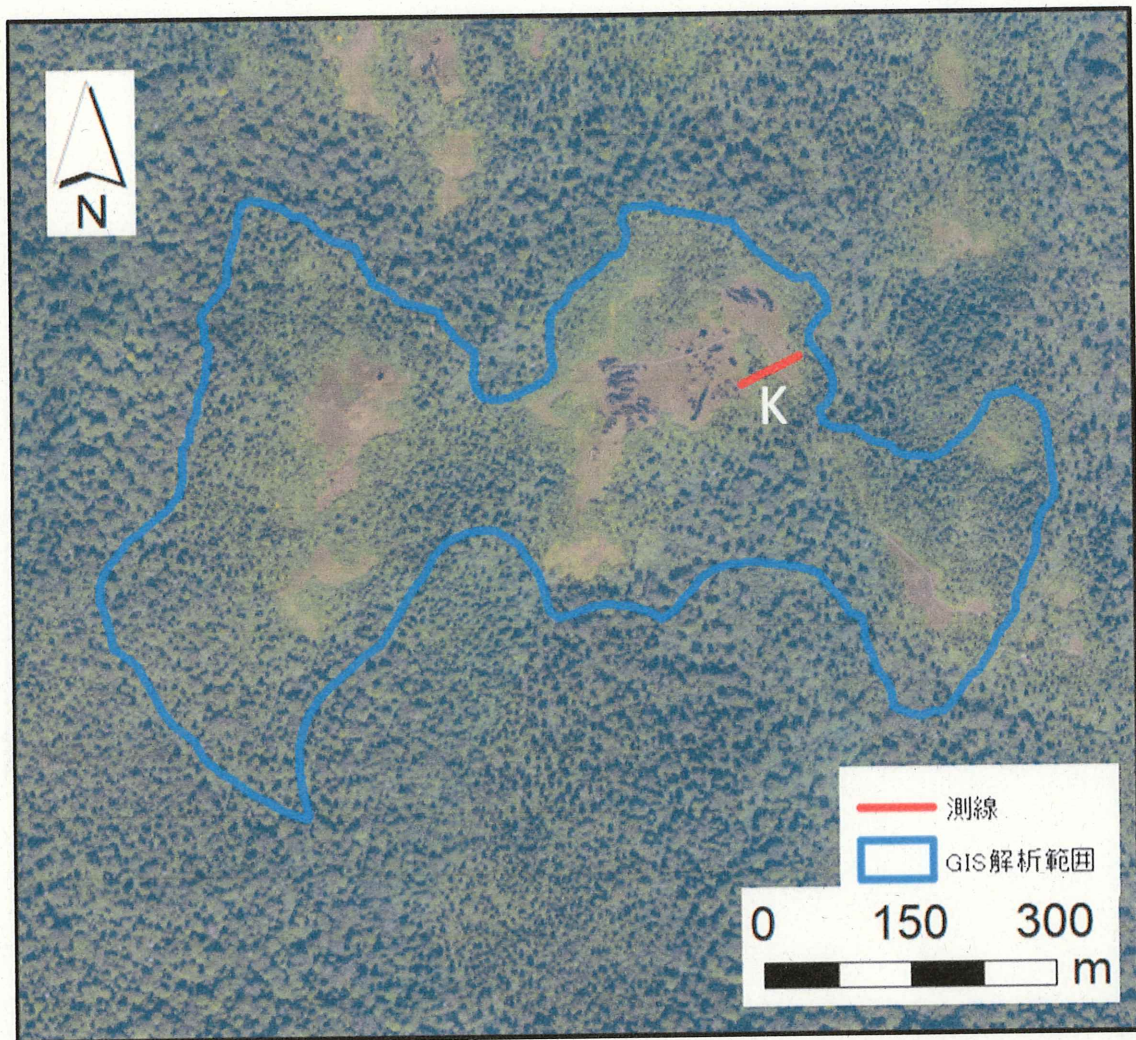


図 15 小松原の現地調査地点

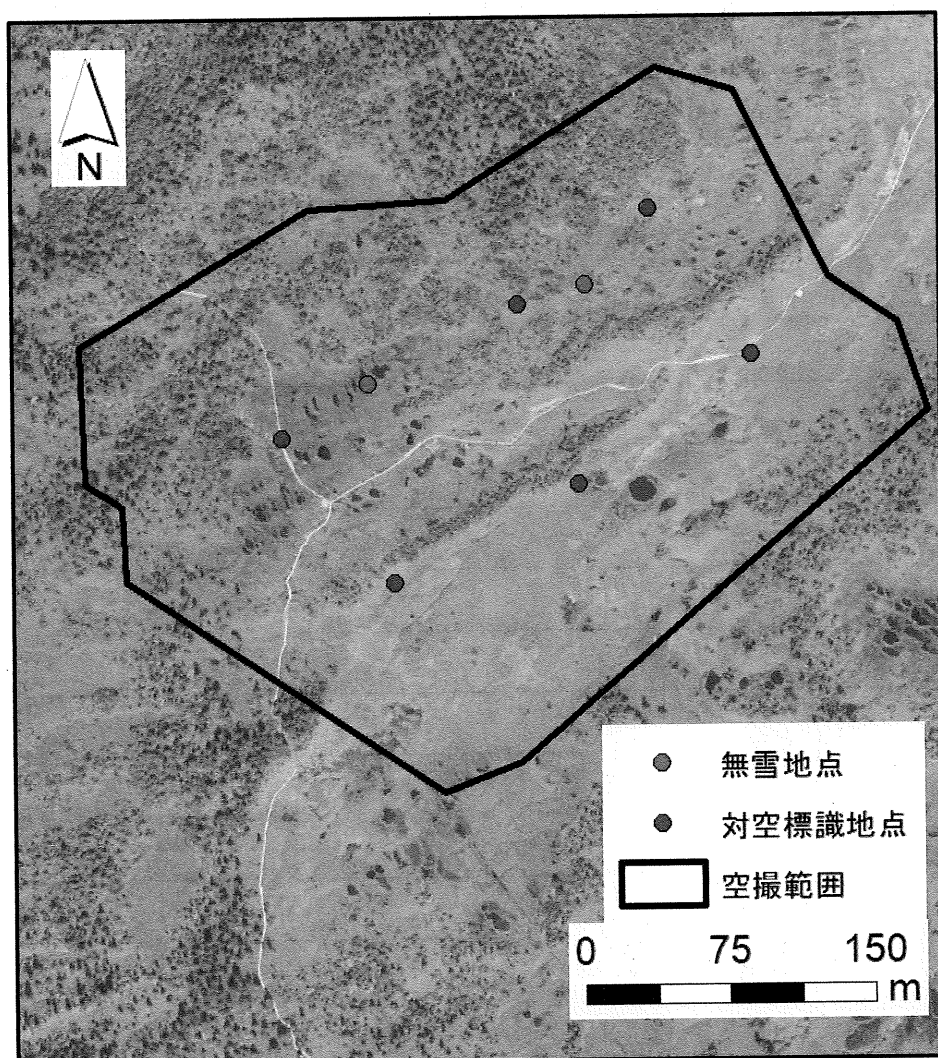


図 16 UAV を用いた空中写真測量の GCP 設置地点

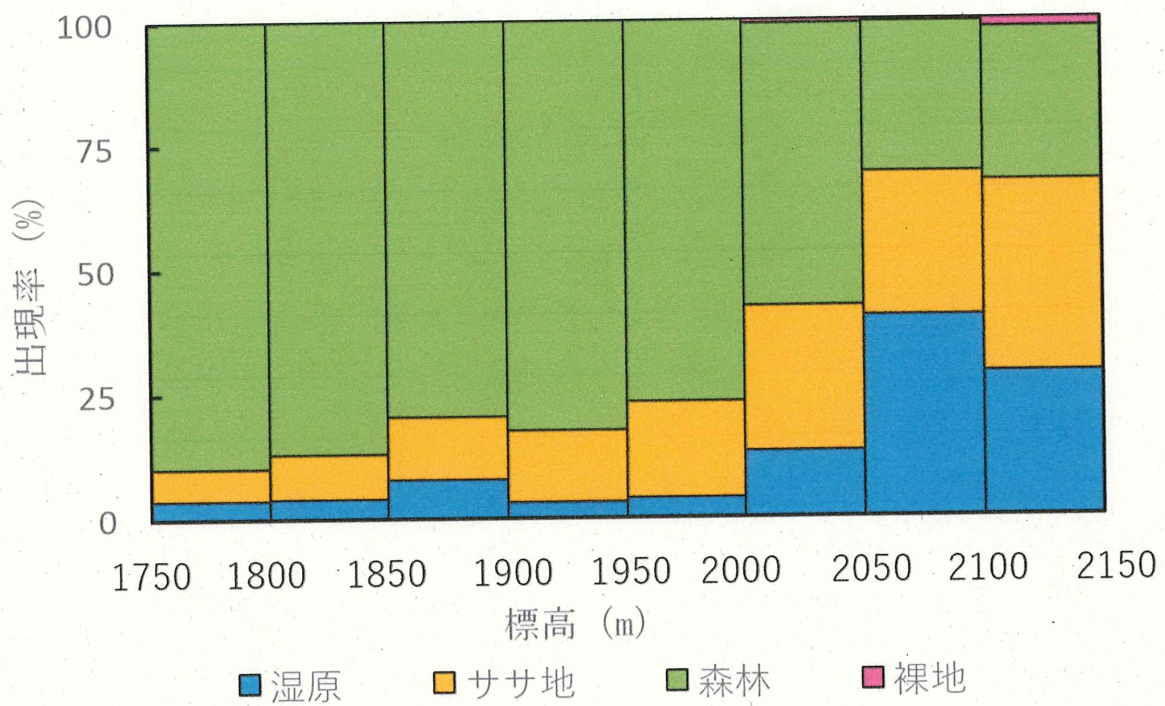


図 17 苗場山における標高 50m ごとの各植生の出現率

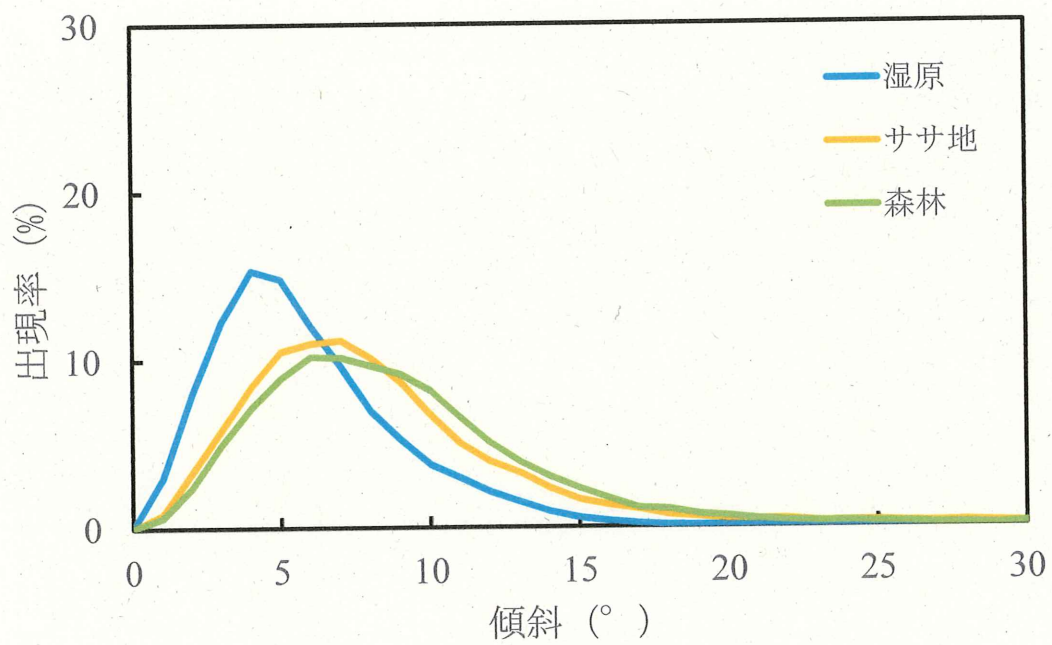
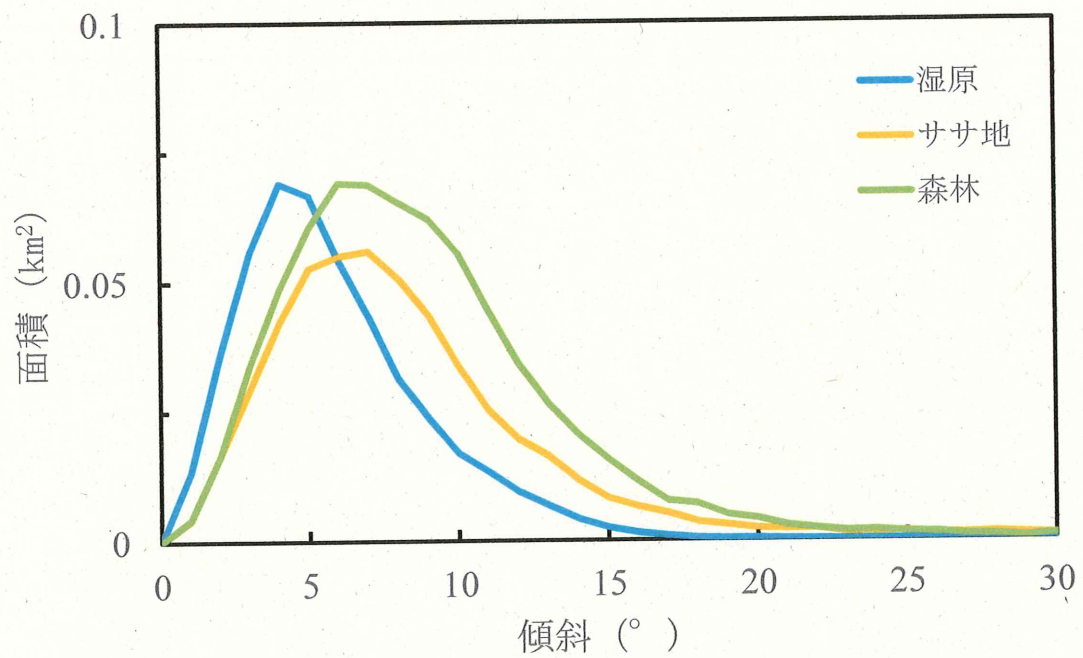


図 18 苗場山の傾斜 1 度ごとの植生別度数分布

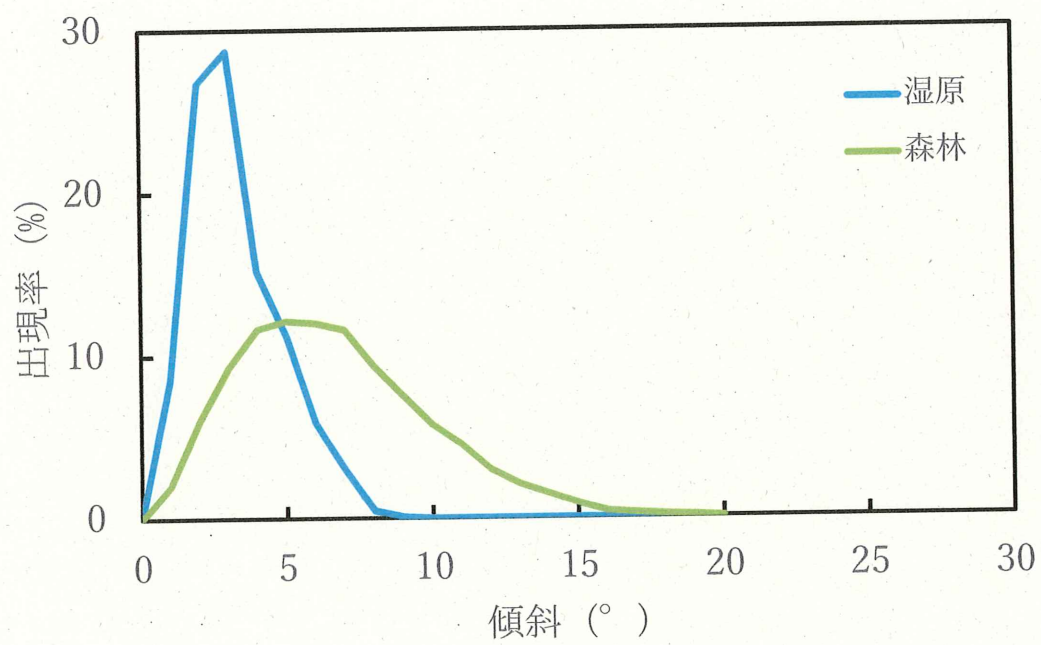
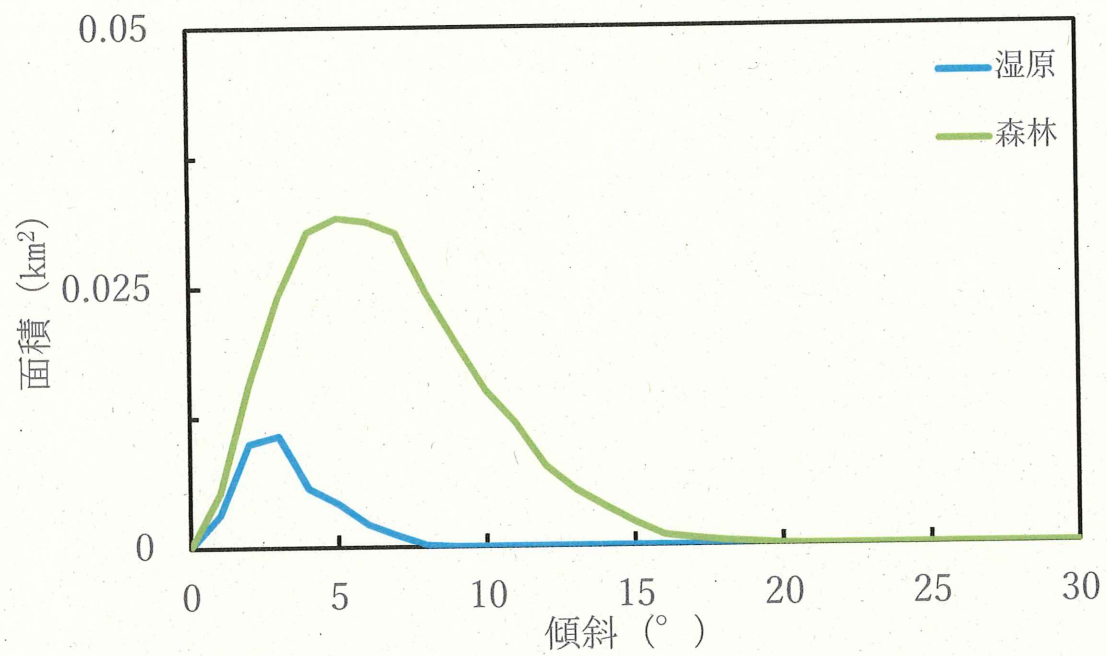


図 19 小松原の傾斜 1 度ごと植生別度数分布

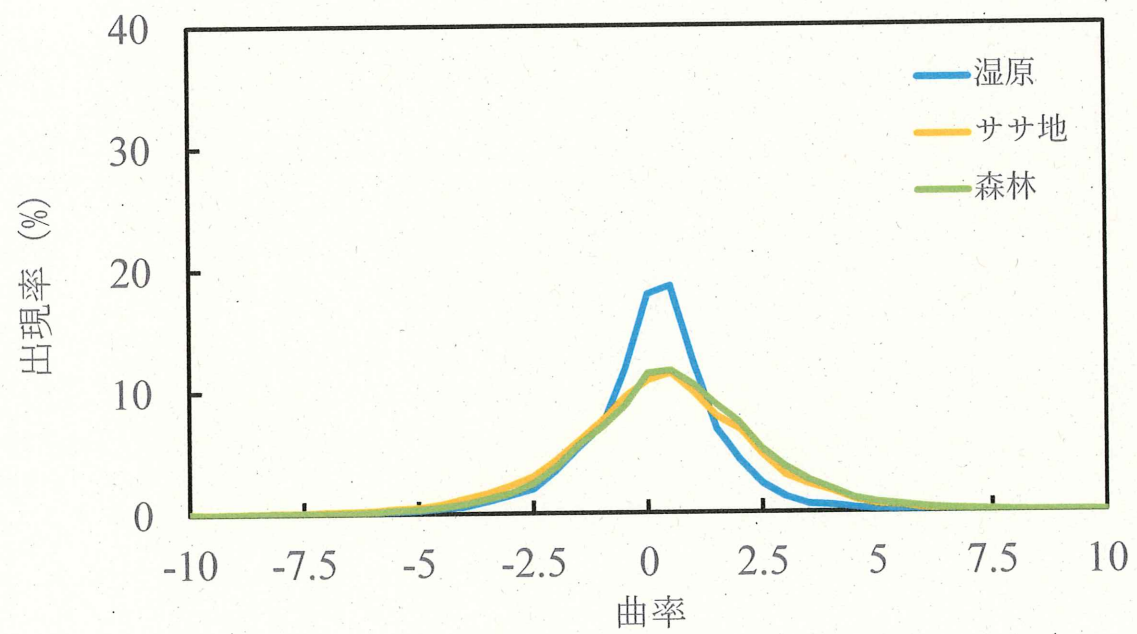
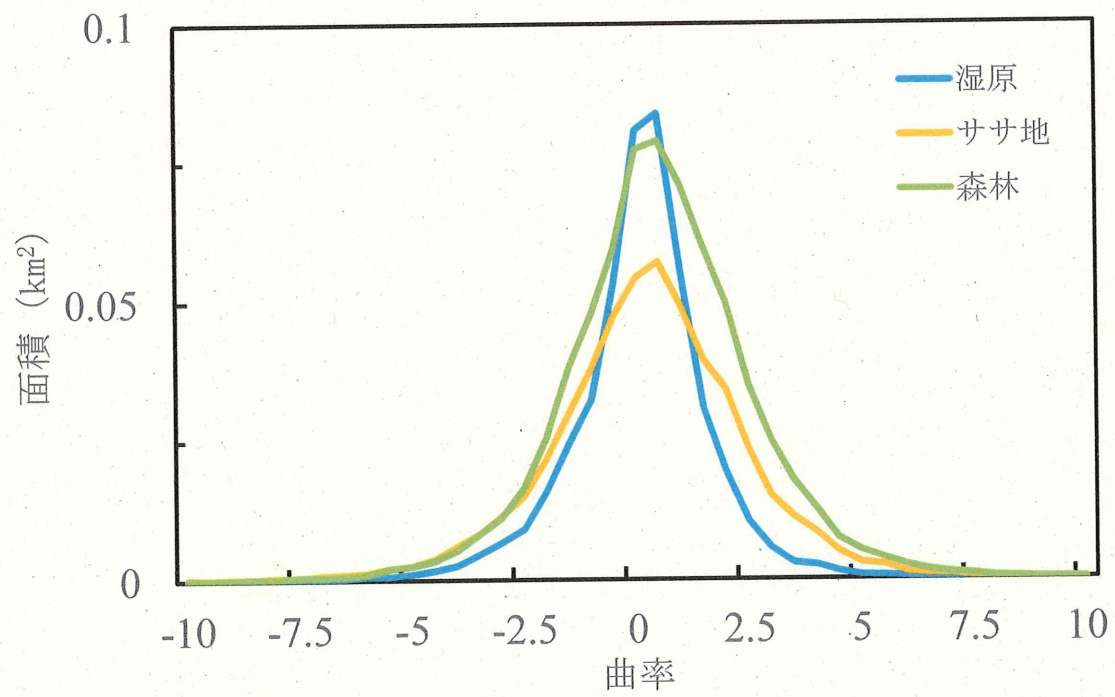


図 20 苗場山の曲率 0.5 ごとの植生別度数分布

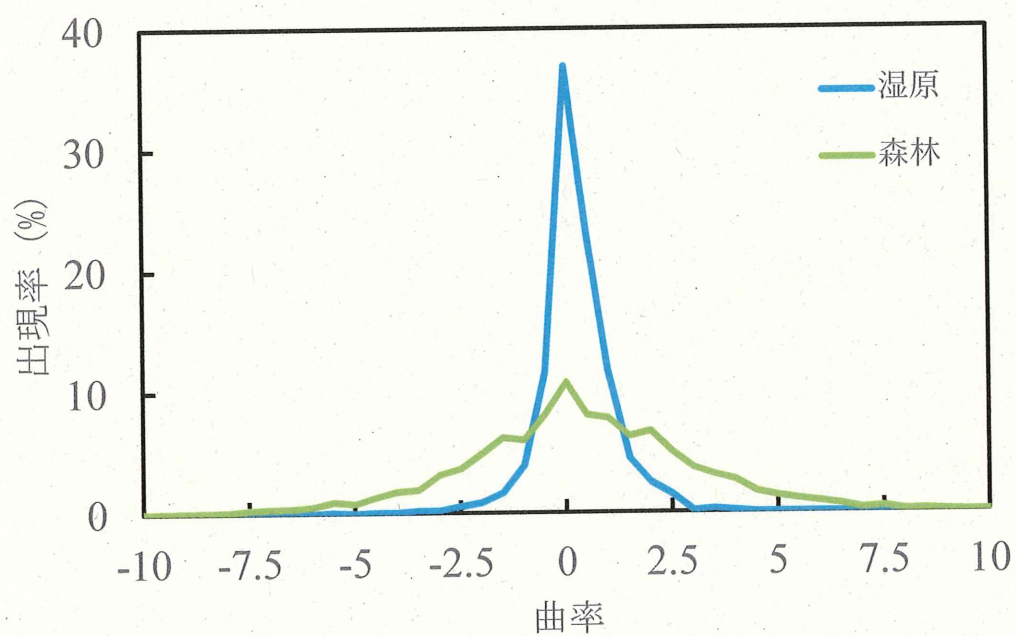
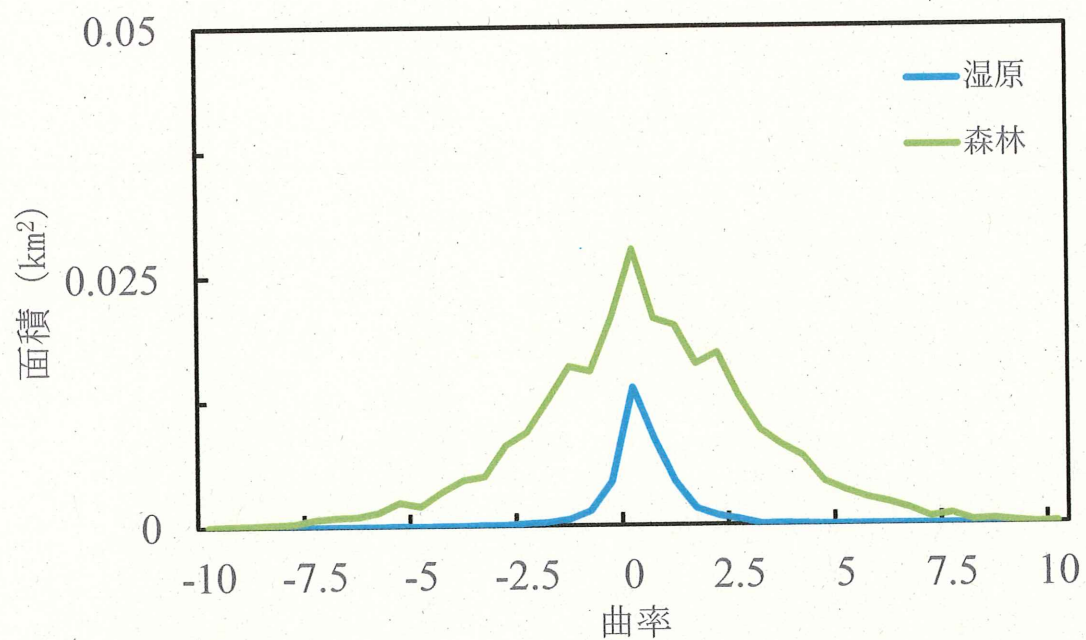


図 21 小松原の曲率 0.5 ごとの植生別度数分布

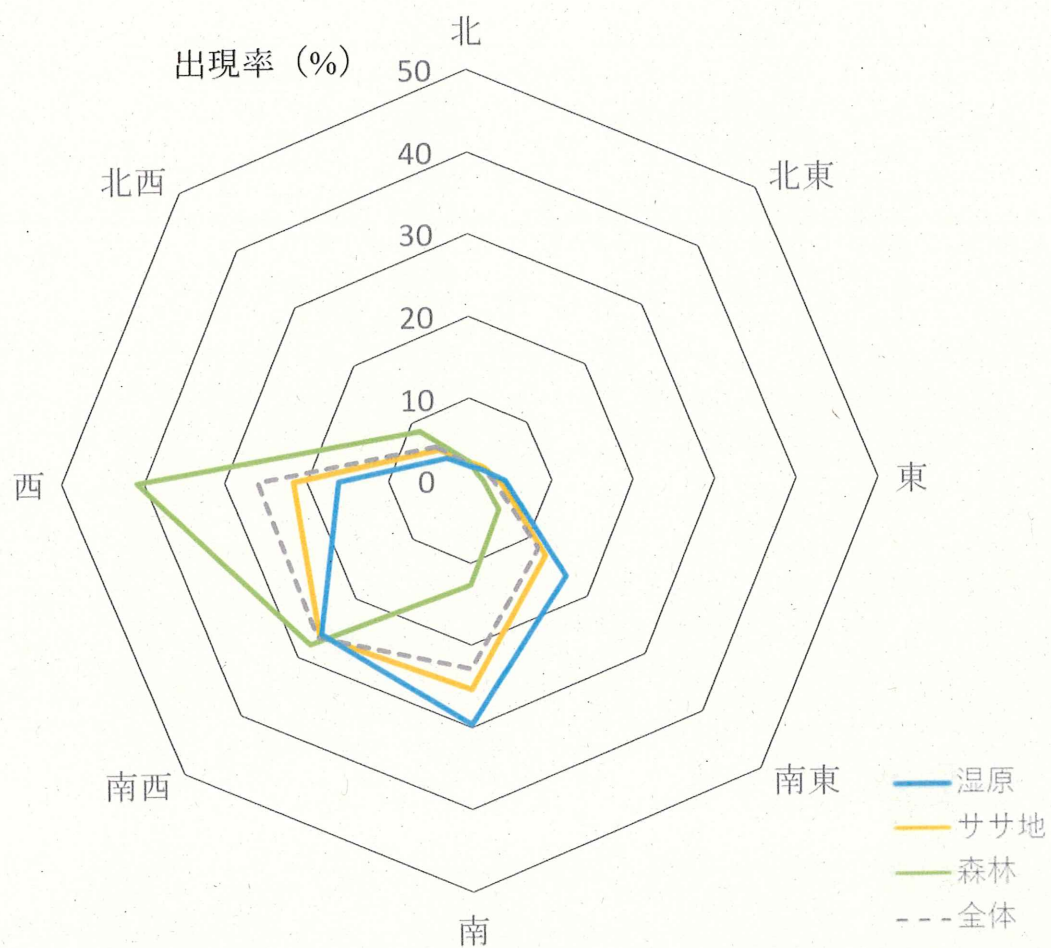


図 22 苗場山の斜面方位（8 方位）に対する植生別出現率

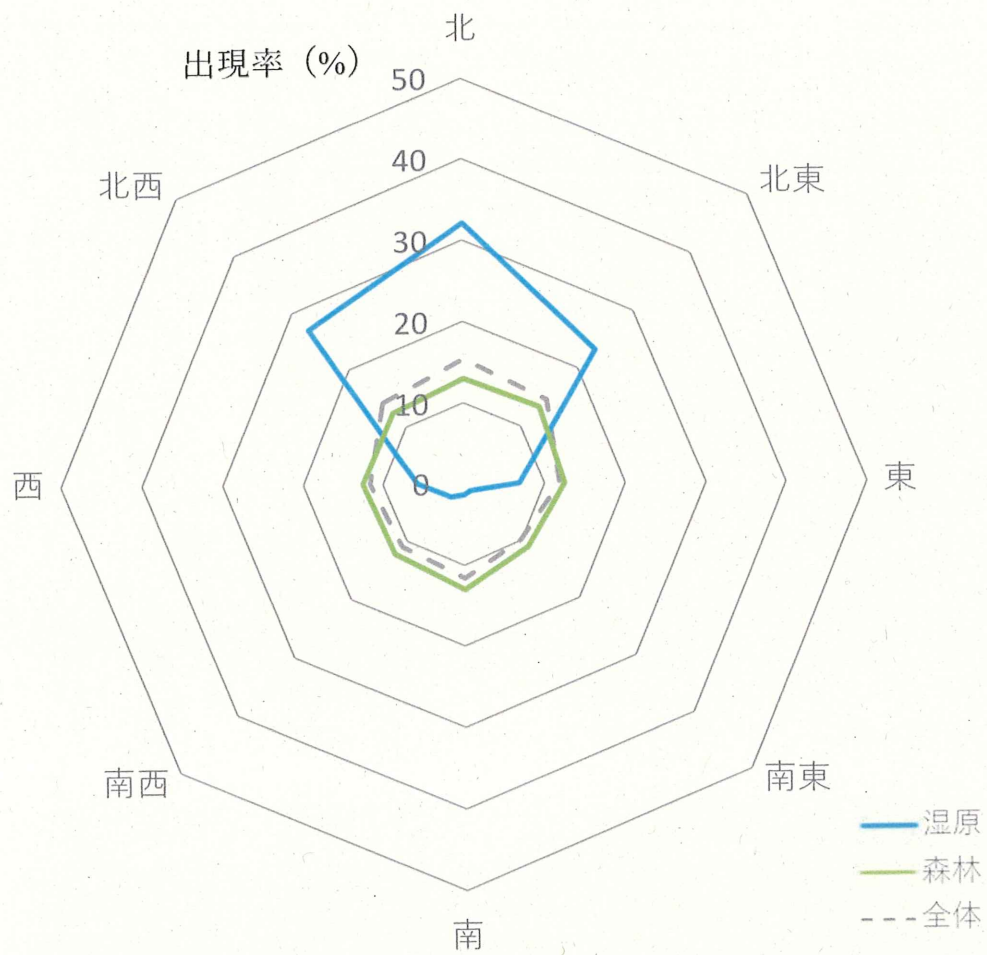


図 23 小松原の斜面方位 (8 方位) に対する植生別出現率

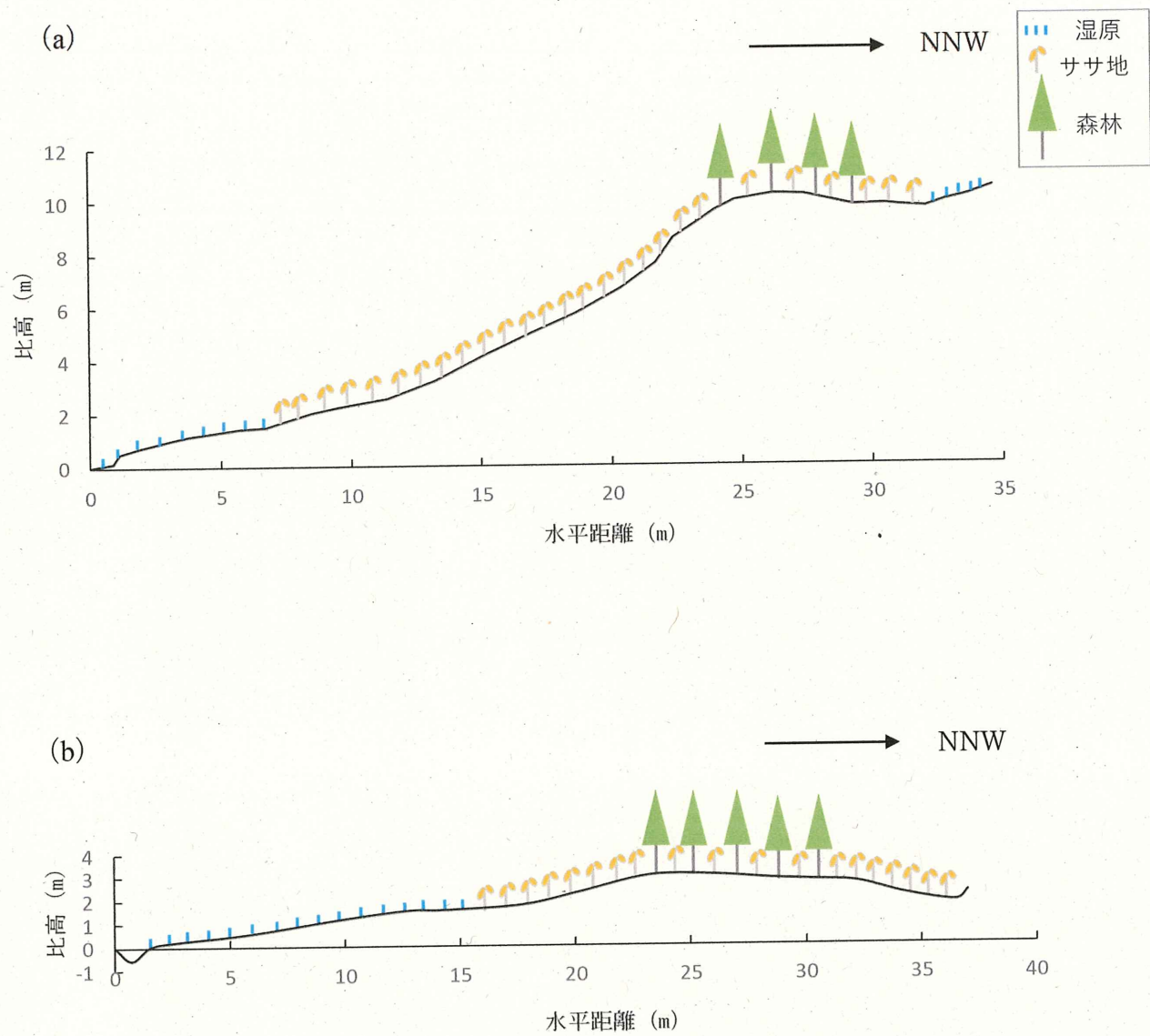


図 24 測線 N1～N4 の断面形と植生

(a) 測線 N1、(b) 測線 N2。

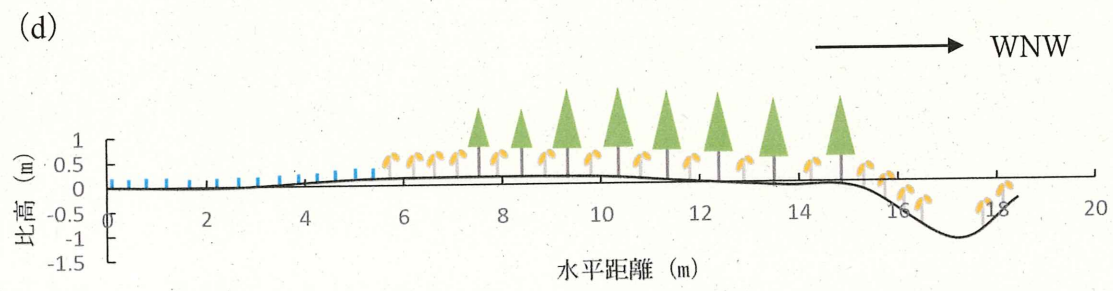
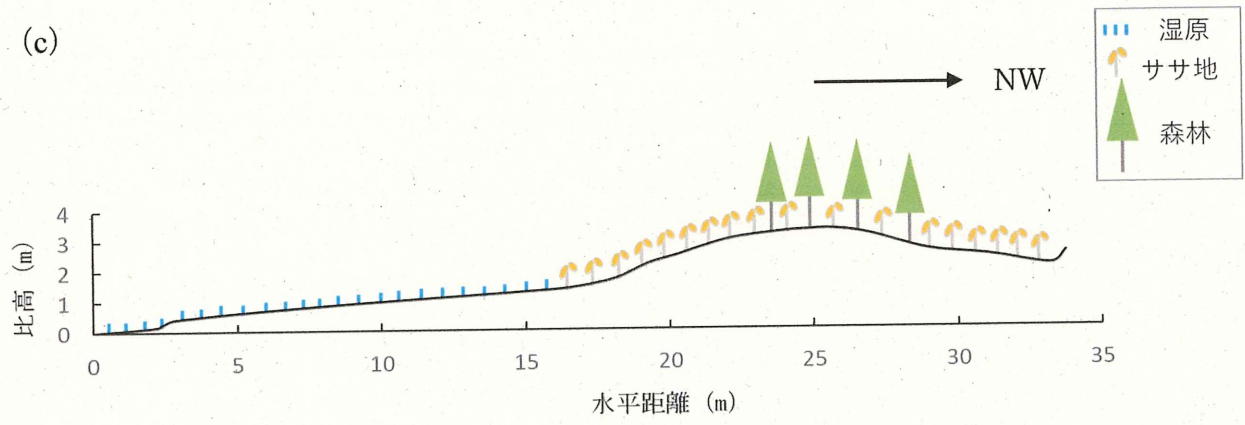


図 24 (続き)

(c) 測線 N3、(d) 測線 N4。

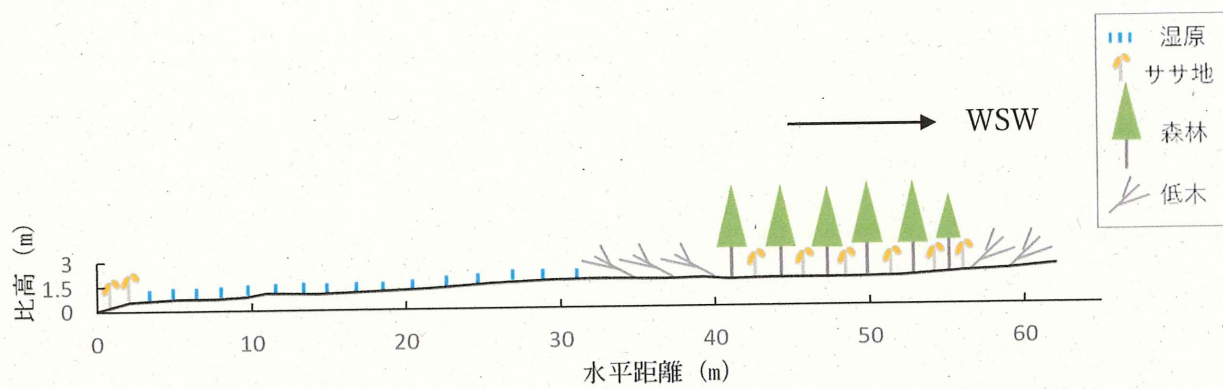


図 25 測線 K の断面形と植生

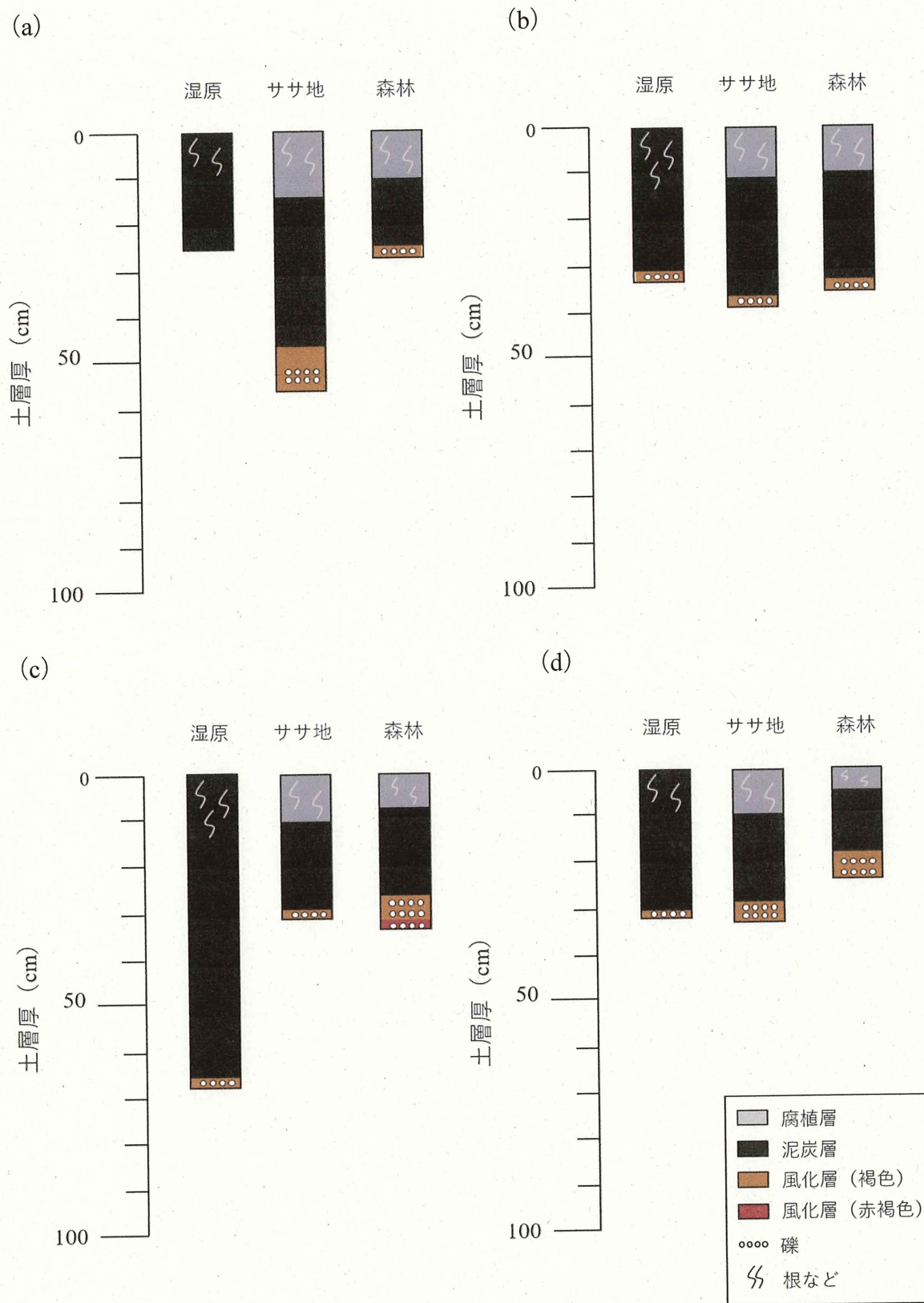


図 26 測線 N1～N4 の土壌断面

(a) 測線 N1、(b) 測線 N2、(c) 測線 N3、(d) 測線 N4。

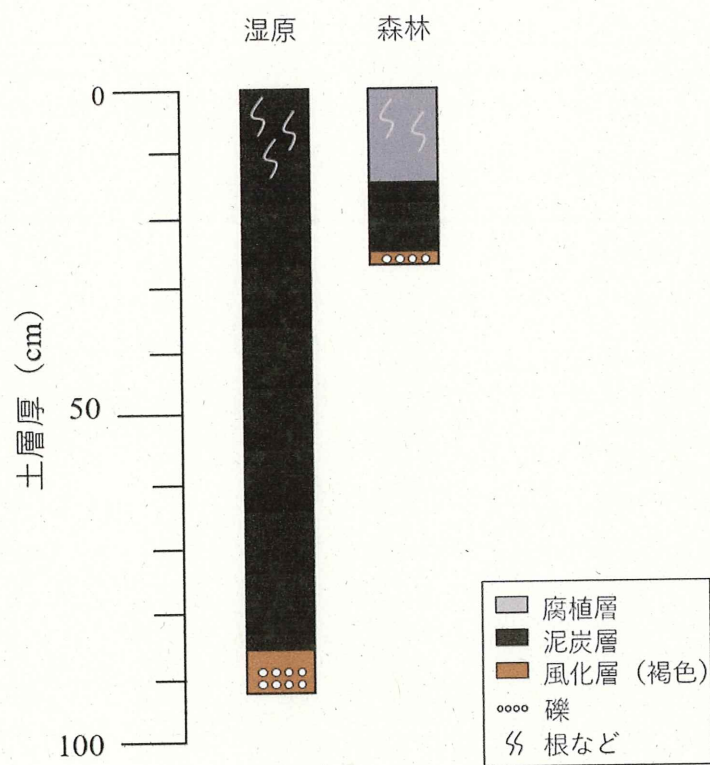


図 27 測線 K の土壌断面

(a)

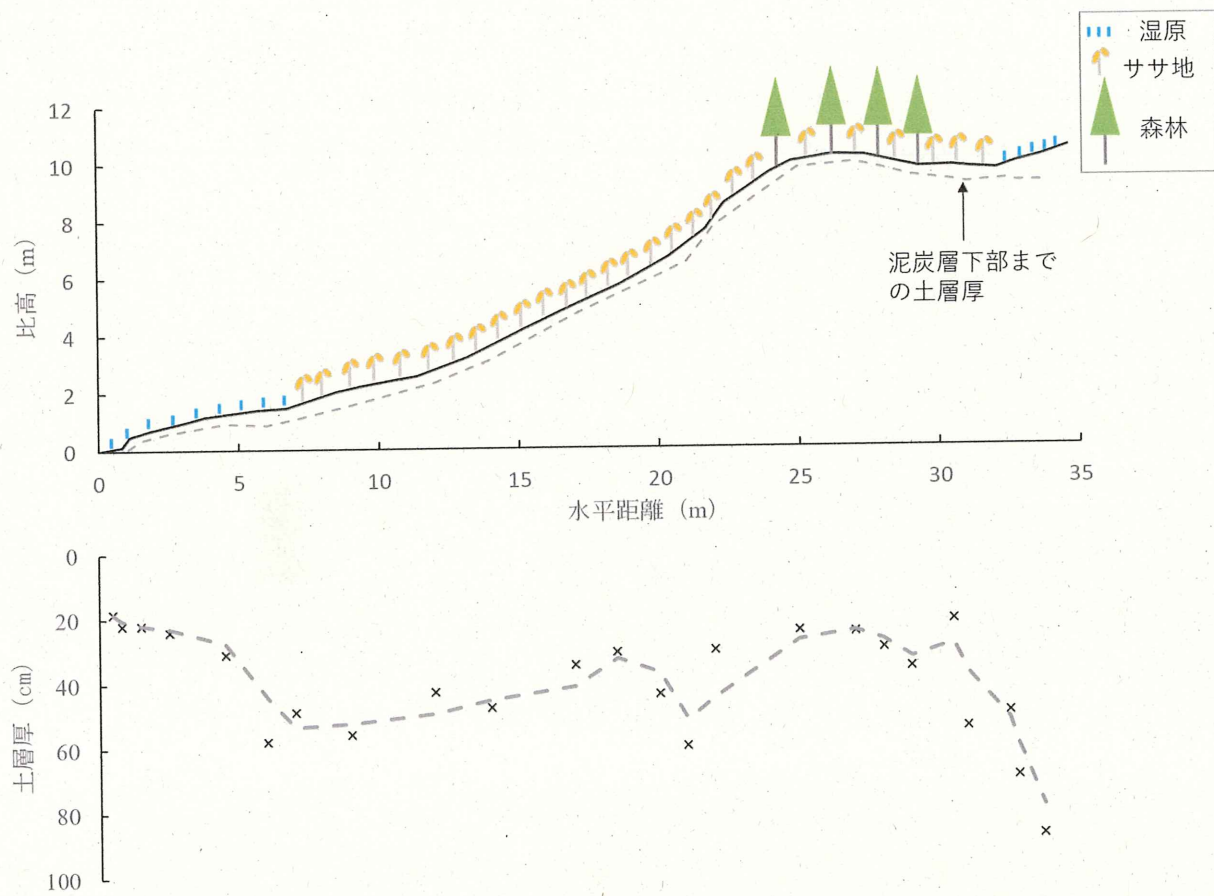


図 28 測線 N1～N4 の断面形と土層厚分布

(a) 測線 N1。

(b)

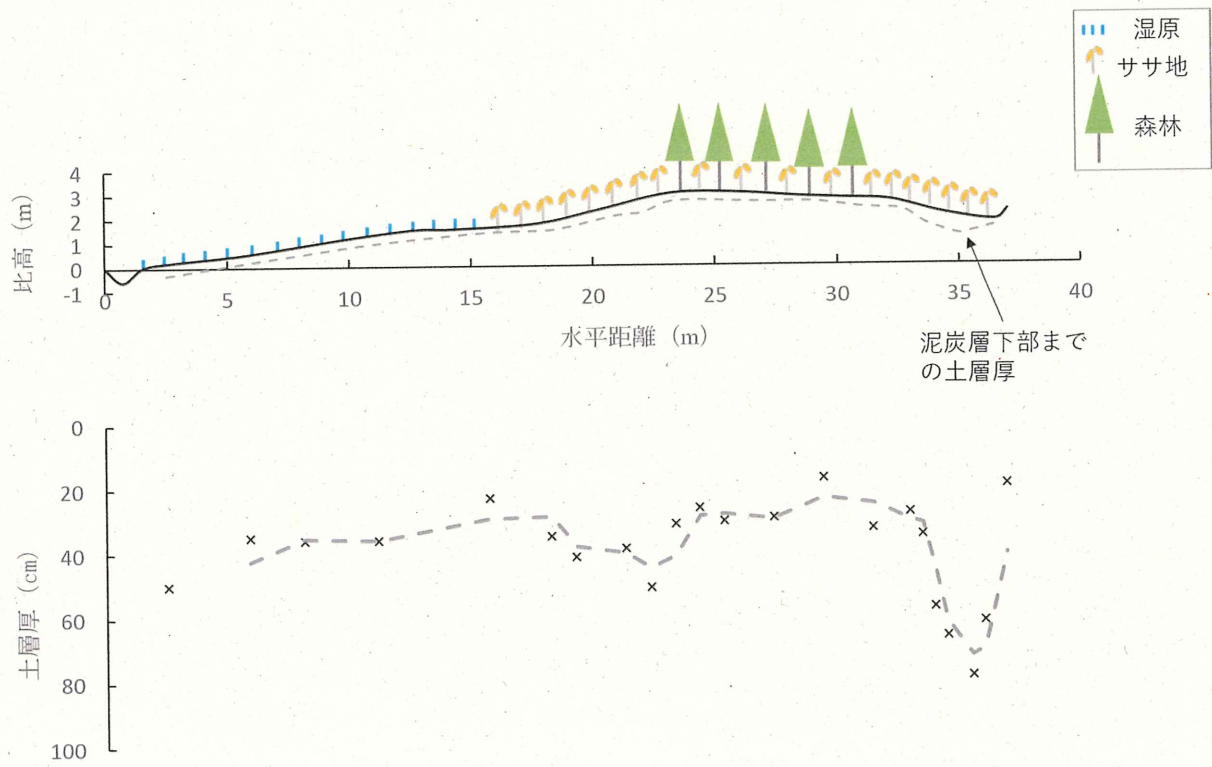


図 28 (続き)

(b) 測線 N2。

(c)

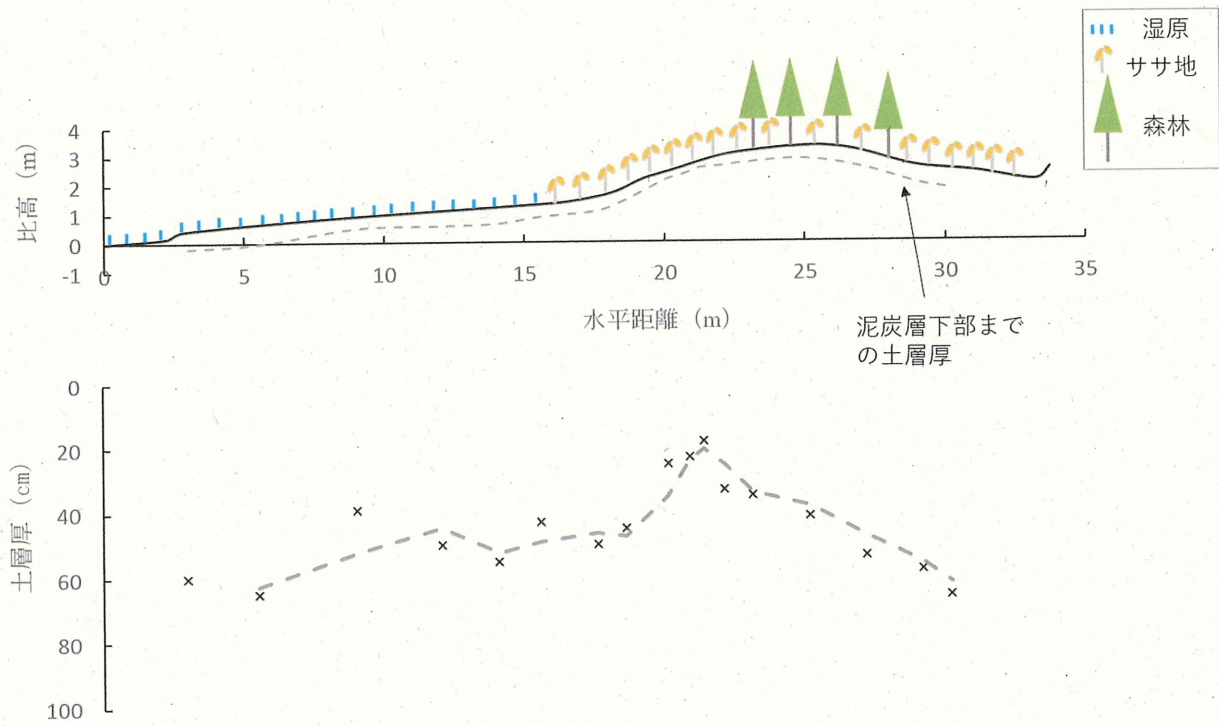


図 28 (続き)

(c) 測線 N3。

(d)

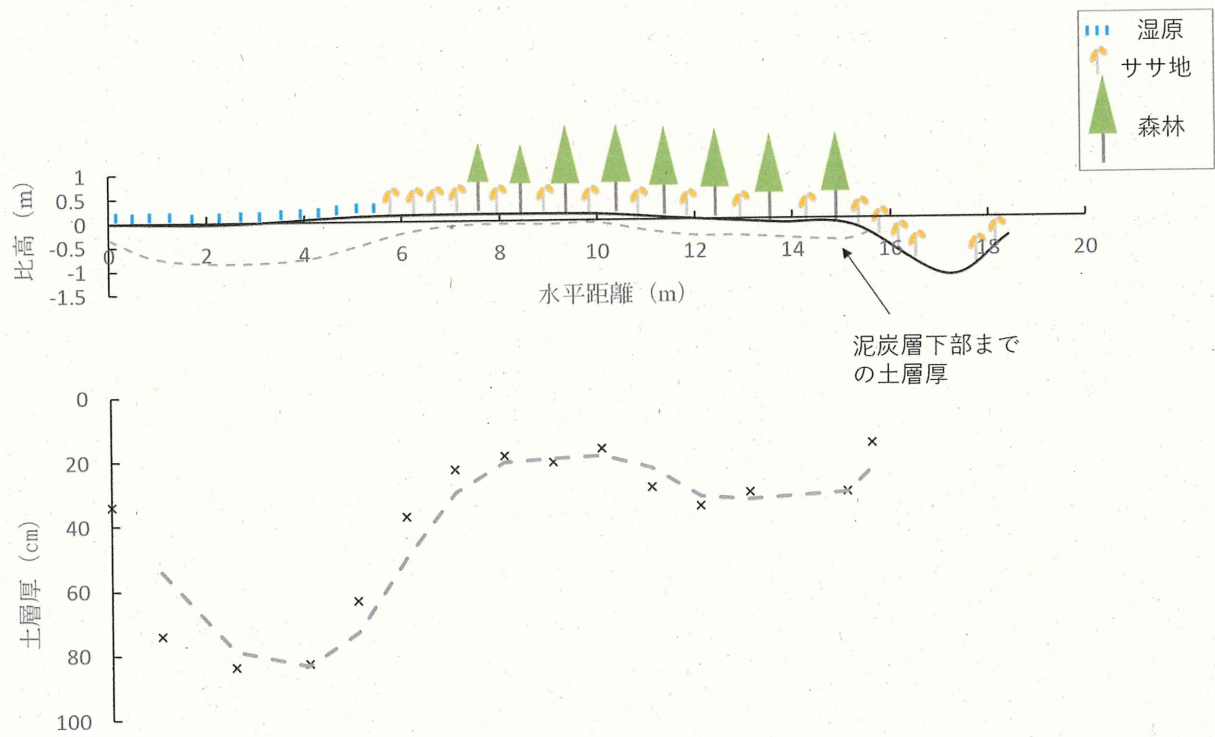


図 28 図 28 (続き)

(d) 測線 N4。

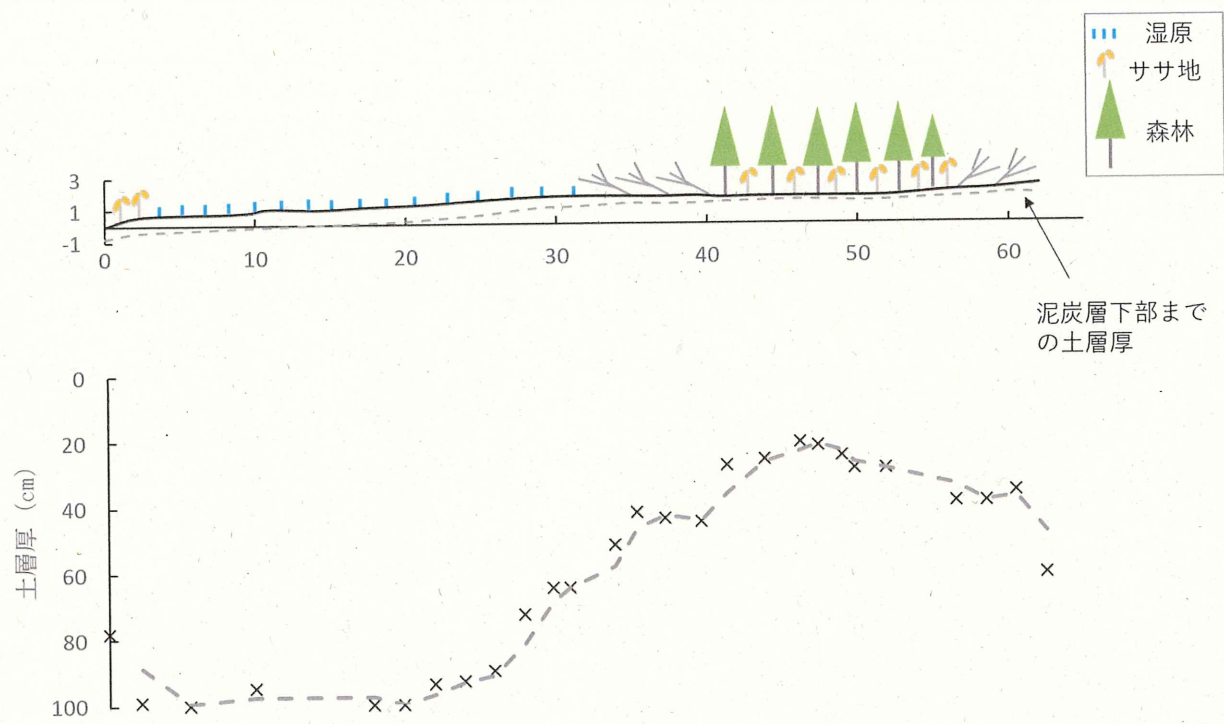


図 29 測線 K の断面形と土層厚分布

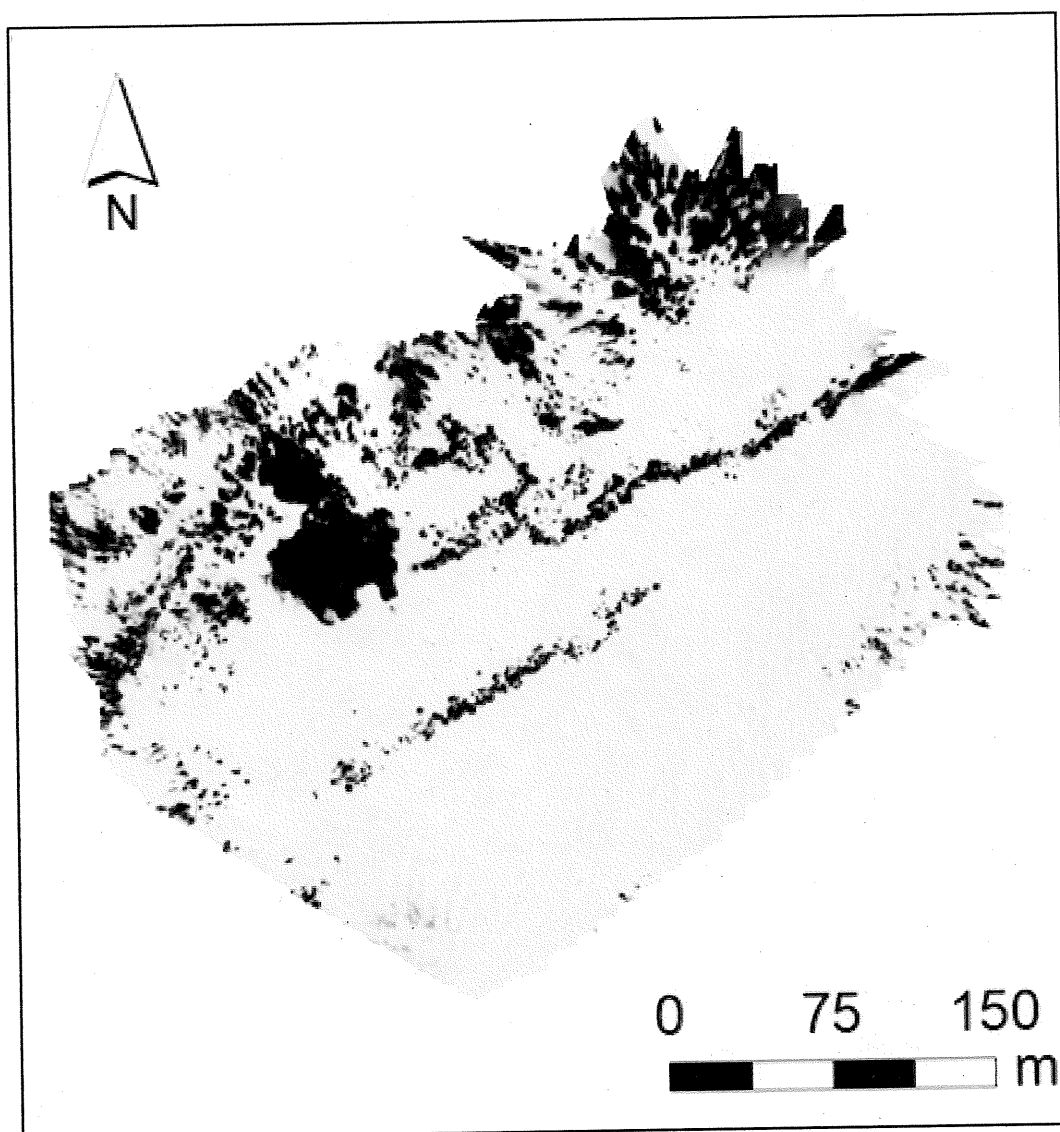


図 30 苗場山山頂部の空撮範囲における積雪の平面分布

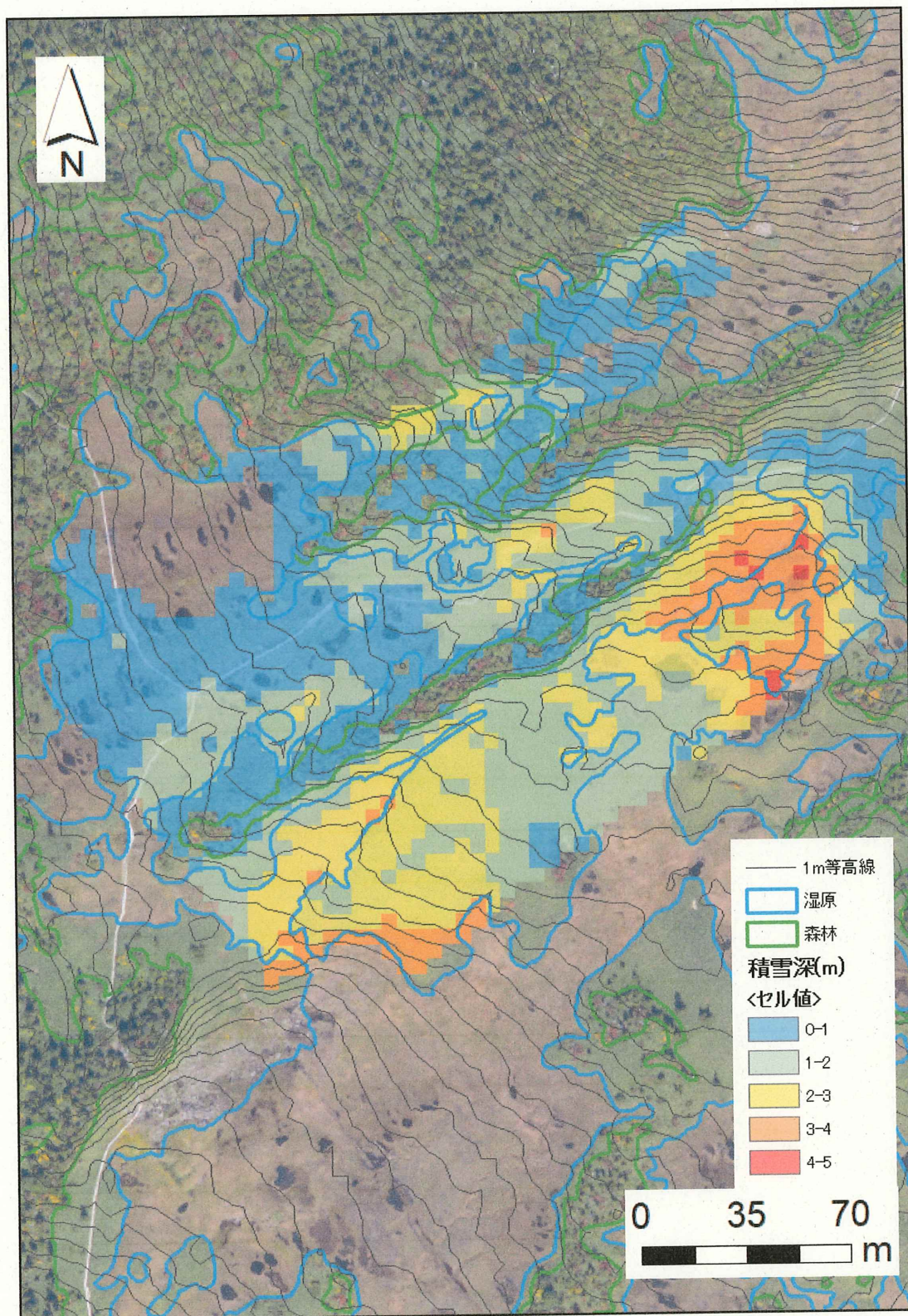


図 31 苗場山山頂部の空撮範囲における積雪深分布

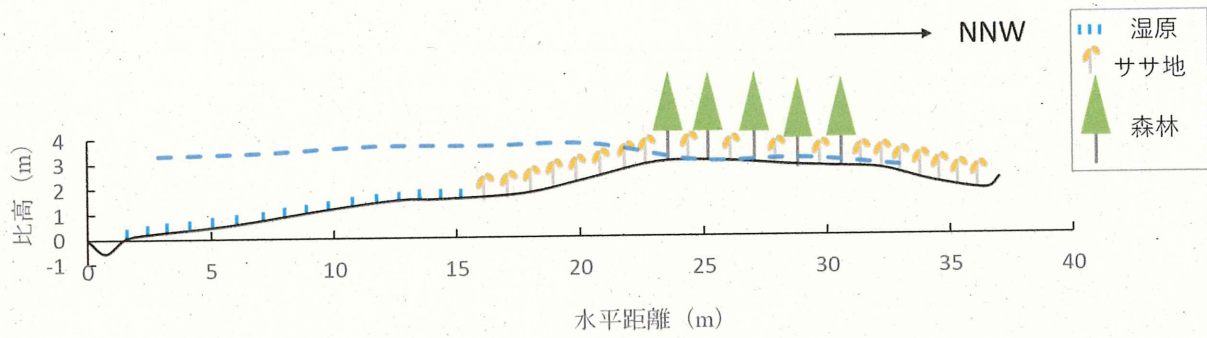


図 32 2017 年 5 月 21 日の測線 N2 の積雪深分布

青色の点線は積雪表面を表している。

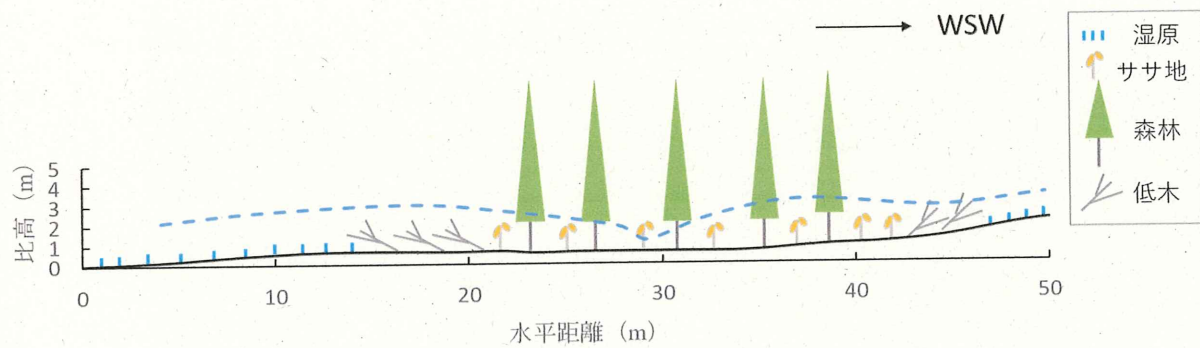


図 33 2017 年 5 月 15 日の測線 K の積雪深分布

青色の点線は積雪表面を表している。

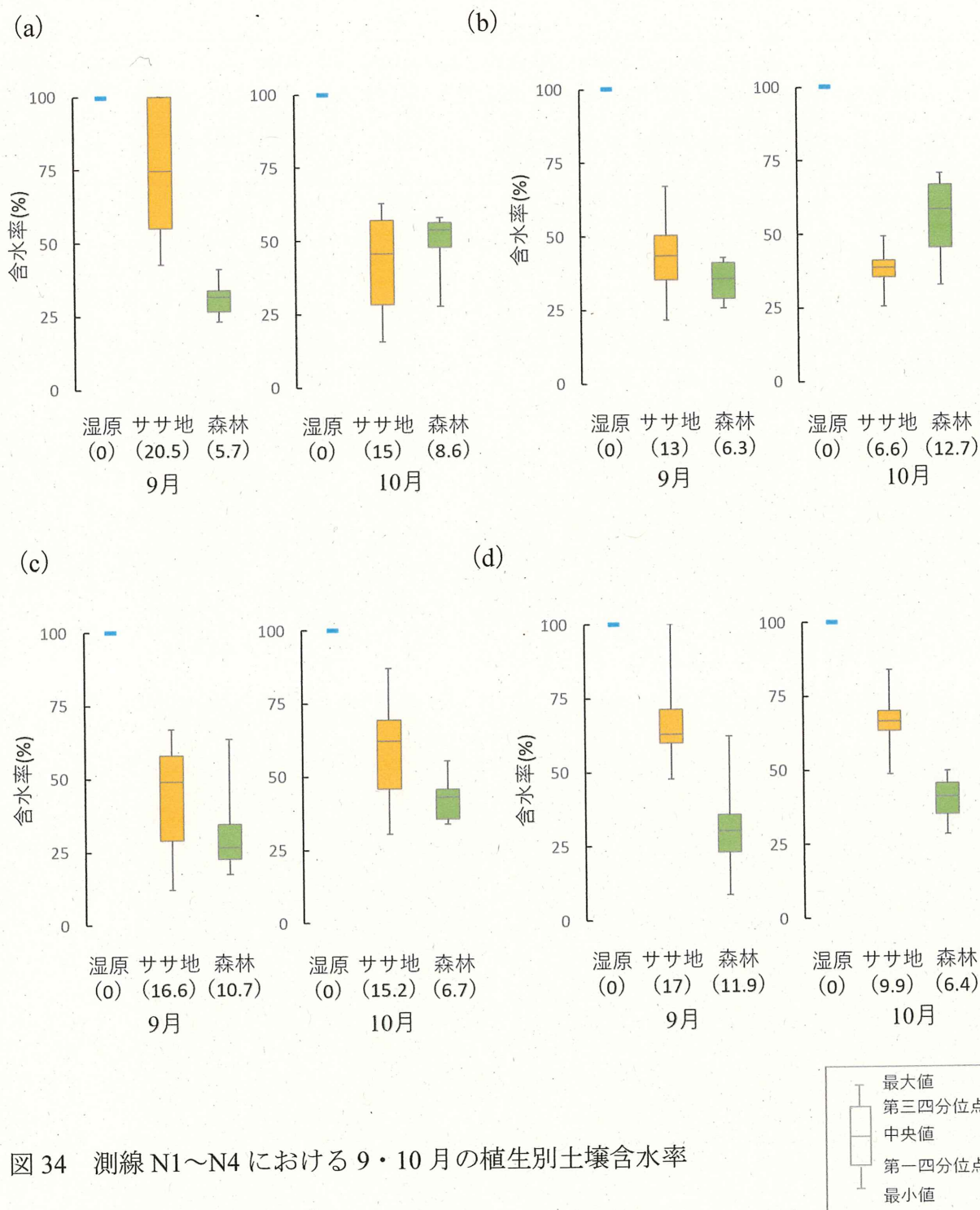


図 34 測線 N1～N4 における 9・10 月の植生別土壌含水率

(a) 測線 N1、(b) 測線 N2、(c) 測線 N3、(d) 測線 N4。

土壌水分の測定は植生ごとに 10 回行った。

括弧内の数字は標準偏差を表す。

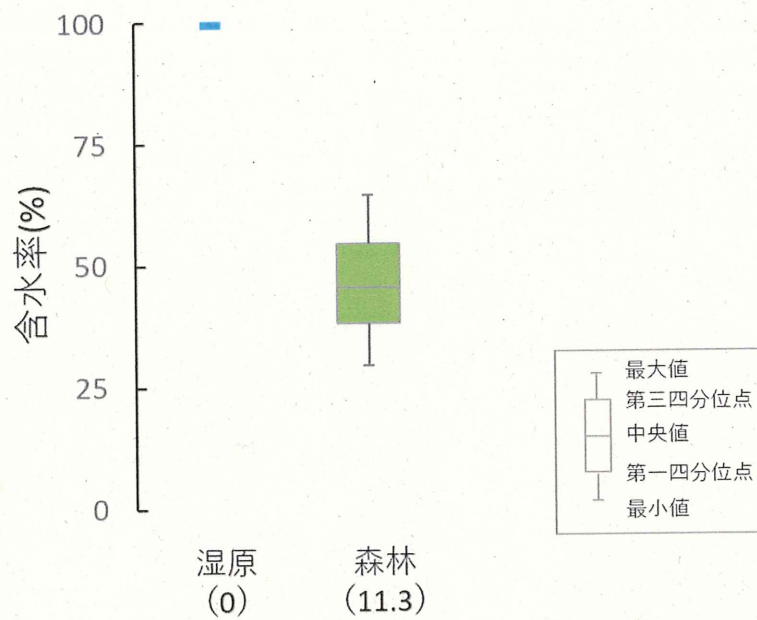


図 35 測線 K における 10 月の植生別土壌含水率

土壌水分の測定は植生ごとに 10 回行った。

括弧内の数字は標準偏差を表す。

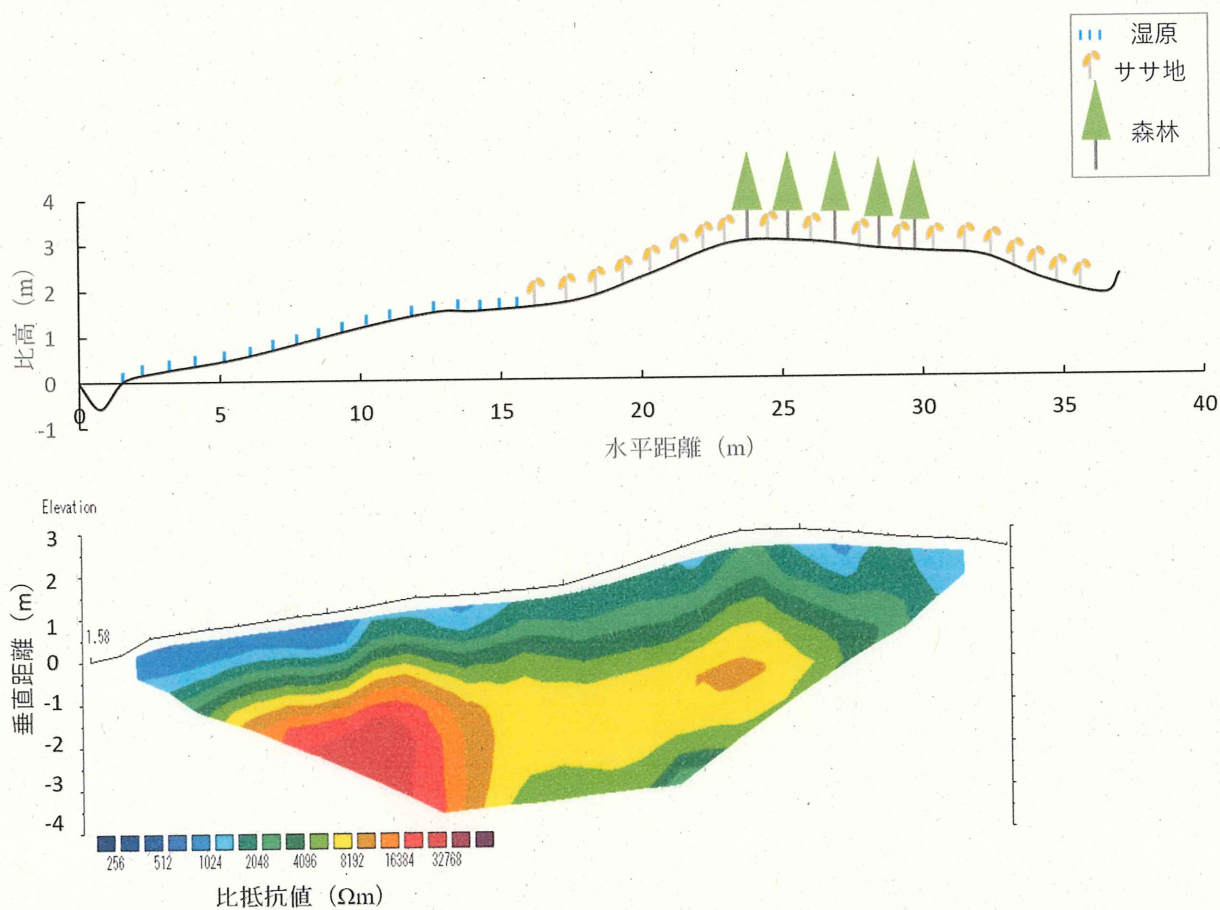


図 36 測線 N2 の断面形と地下の比抵抗構造

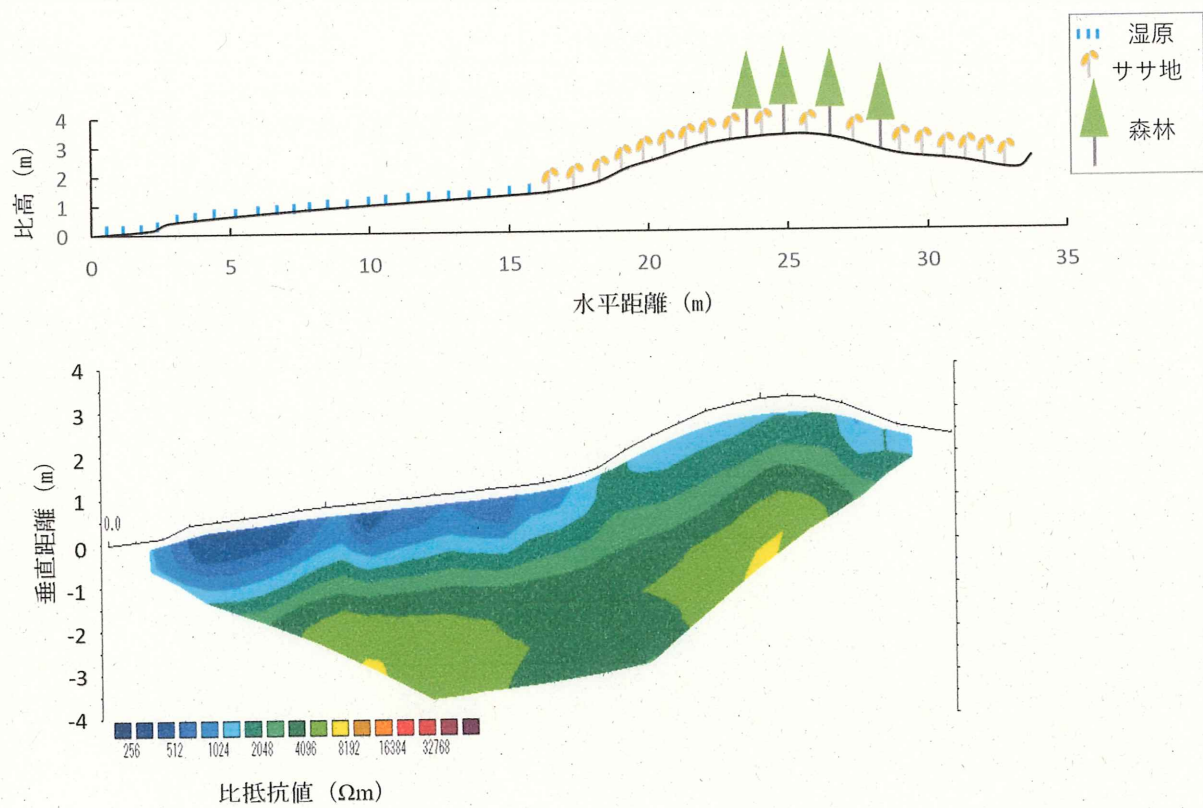


図 37 測線 N3 の断面形と地下の比抵抗構造

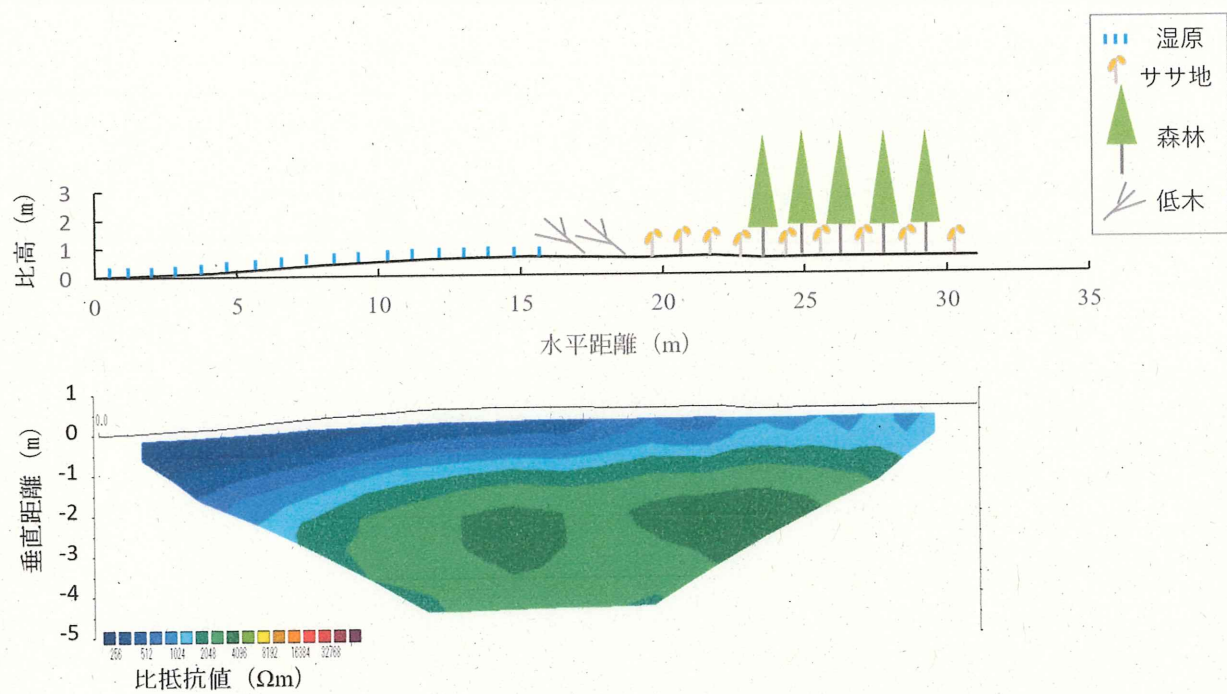


図 38 測線 K の断面形と地下の比抵抗構造

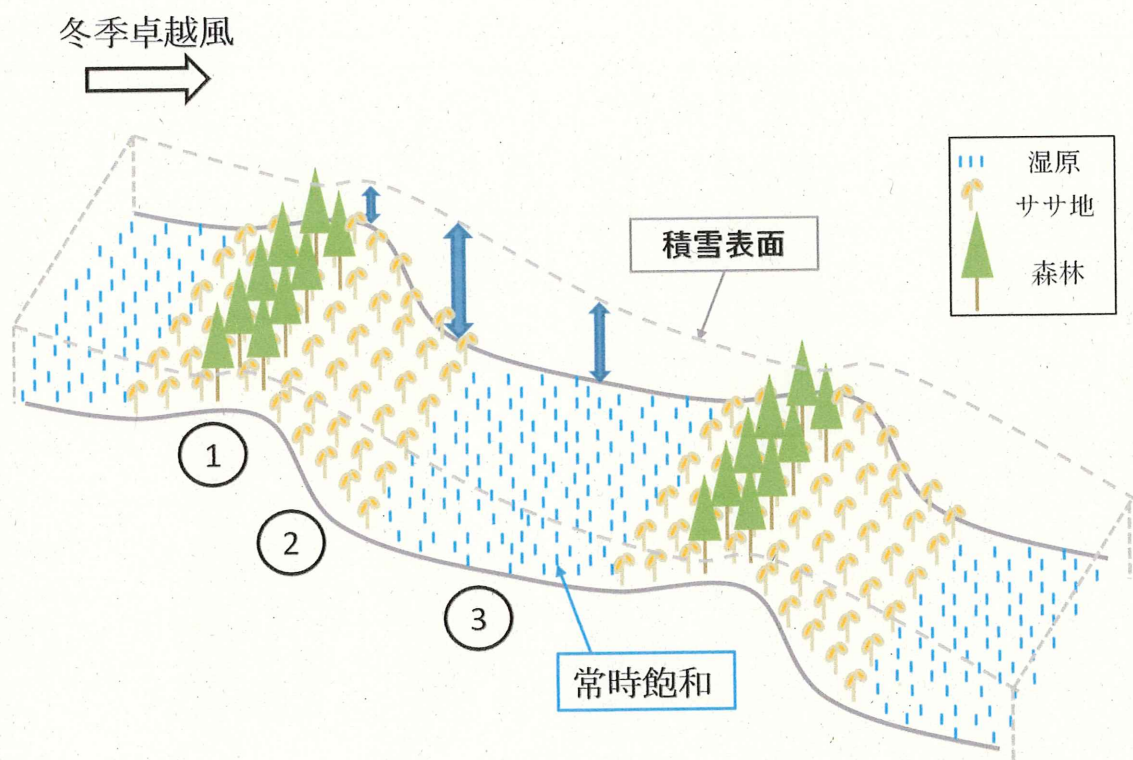


図 39 植生と地形、積雪深、土壌水分の対応関係

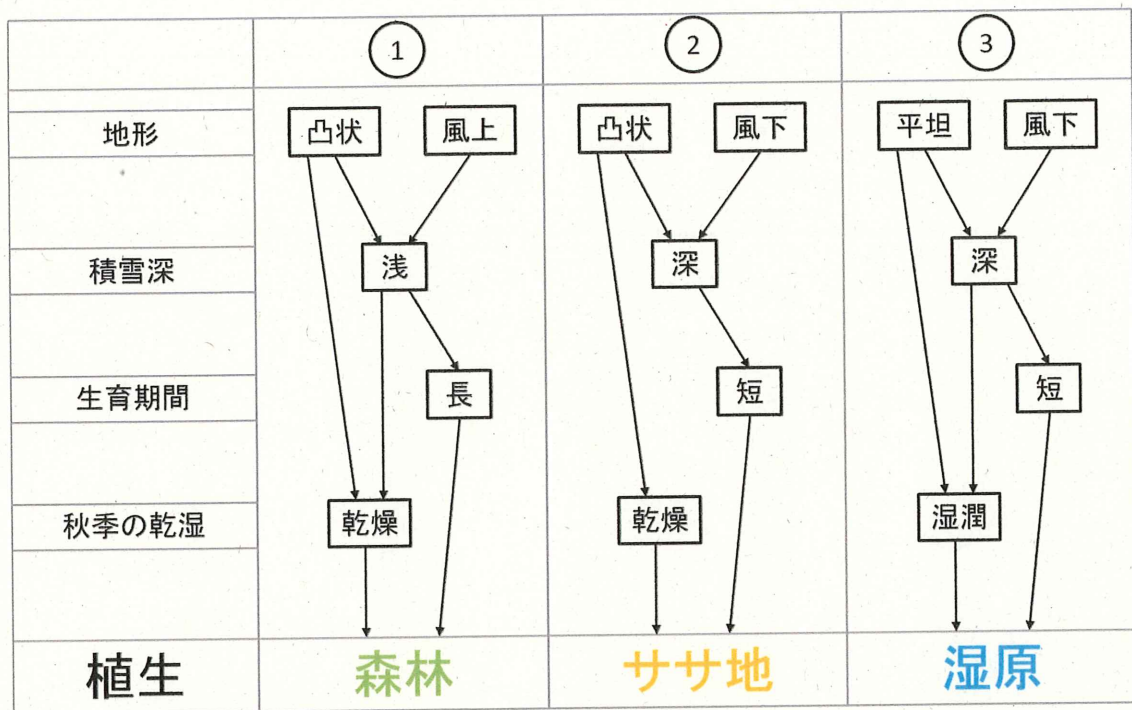


図 40 湿原と森林の指交関係の成因

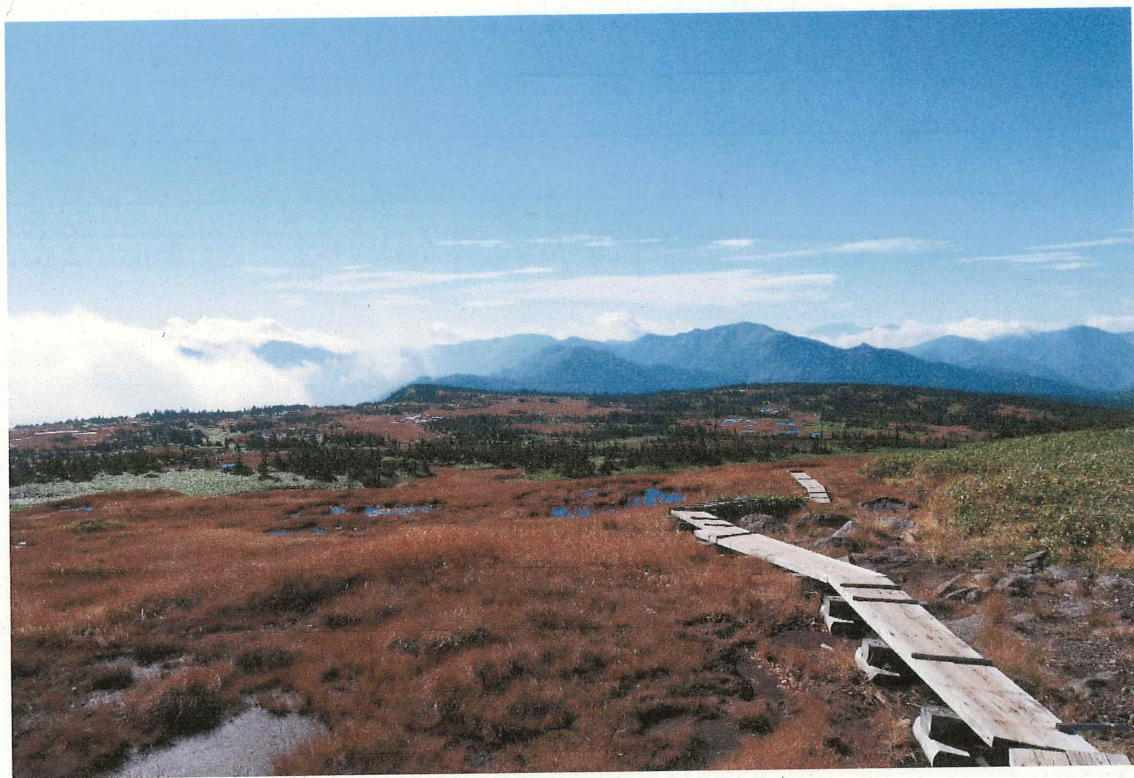


写真1 苗場山山頂の景観



写真2 苗場山における湿原と森林の境界部（微起伏が存在する）



写真3 苗場山における湿原と森林の境界部（微起伏が存在しない）



写真4 小松原上ノ代の景観



写真5 電気探査の様子（苗場山の測線 N2）



写真6 湿原の土壌の露頭

泥炭層の下部に灰白色の溶脱層が認められる。