

空間情報を用いた高山帯の植生変化と環境変動のセンサス

Census of vegetation and environmental change in alpine zones using spatial information

金子 正美^{1*}・星野 仏方¹・雨谷 教弘²
Masami KANEKO^{1*}, Buho HOSHINO¹ and Yukihiro AMAGAI²

¹ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類

² 北海道大学大学院環境科学院

¹Department of Environmental Symbiotic, Rakuno Gakuen University

²Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University

摘 要

北海道大雪山系では融雪時期の早期化や土壤乾燥化などの影響で、乾燥化の指標種とされているチシマザサ (*Sasa kurilensis*, 以下, ササ) やハイマツ (*Pinus pumila*) などの低木が分布域を拡大している。それと対応して、高山湿生植物群落の分布域が縮小し、高山植物の局所的な絶滅が危惧されている。本研究では北海道大雪山国立公園の五色ヶ原を解析モデル区とし、植生変動の定量化と変動のメカニズムを明らかにするために、現地調査、現地計測、航空機、及びマイクロ波衛星観測の手法を用いて、植生判別と植生変動地域の抽出、植生変動地域における地表面特性の抽出、植生変動地域における土壤水分の分布と季節変動の抽出、及びササ侵入危険地域の予測などを行った。特に土壤水分の季節変動の推定の研究では、植生密生地域において植物の下層にある土壤水分の季節変動の推定に初めて成功した。研究対象地では、ササの拡大が最も顕著な木道周辺で、1977年から2009年までの31年間で30%拡大していた。またハイマツも14%増加し、樹高生長も見られた。ササの増加地域は、斜面方位が主として東斜面であり、傾斜度が0-20度以下、日射量が高い(80-90 KWh/m²) 場所で選好性を示した。マイクロ波を用いた植生変動地域における土壤水分の季節変化は、ササ分布域では土壤水分の減少(乾燥化)が顕著に現れた。GISの解析により、アナログ空中写真とマイクロ波データを重ねあわせて解析することにより、植生変化と環境変動を詳細に把握することが可能となった。

キーワード：山岳生態系, GIS, チシマザサ, 土壤水分, リモートセンシング

Key words : mountain ecosystems, GIS, *Sasa kurilensis*, soil moisture, remote sensing

1. はじめに

気候変動に伴う地球温暖化の陸域生態系への影響は、特に極地や高山帯で顕著であると予測されている¹⁾。寒冷圏の陸域生態系では、気温の温暖化や積雪期間の短縮に伴う低木植物の急速な分布拡大が各地で報告されている²⁾⁻⁴⁾。近年、北海道の山岳地域においても気温上昇と融雪時期の早期化が起きていることが明らかになっている⁵⁾。融雪時期の早期化が植物の生育期間を延長し、また土壤乾燥化を進行させることにより、チシマザサ(*Sasa kurilensis*, 以下, ササ)のような低木植物の分布を拡大しやすい環境を作り、その結果、高山植生が急速に衰退している地域が見られる^{6), 7)}。また、ハイマツ(*Pinus pumila*)は高山帯においてきわめて大きなバイオマ

スを有しており、ハイマツの動向は他の高山植生にも強い影響を及ぼす^{8), 9)}。過去30~50年間に北海道の山岳地域では、融雪時期の早期化や土壤乾燥化などの影響で、ササやハイマツなどの低木が分布域を拡大し、多くの高山植物の分布域が縮小し、更に高山植物の絶滅も危惧されている^{6), 10)}。しかし、我が国最大の山岳国立公園である大雪山系において、ササやハイマツがどのような場所でどの程度拡大しているのかについての定量的な情報はほとんどなく、また、その引き金となっている環境要因の特定も未解明である。

植生の分布変化の定量的な把握と要因解析には、GIS及びリモートセンシングによる解析とモニタリングが有効である。しかし、人工衛星画像を活用する場合、山岳地域では晴天日が少ないため、従来の

受付：2013年12月9日、受理：2014年3月7日

* 〒069-8501 北海道江別市文京台緑町582, e-mail: kaneko@rakuno.ac.jp

地球観測衛星の光学センサーではデータの取得そのものが難しい。また、10 m 程度の空間解像度では植物の種類毎の分類が困難であり、成長の遅い植生変化を検出するには数十年間の比較が必要であるため、現在の衛星光学センサーのデータの比較のみで高山植生変化を解析することは難しい^{11), 12)}。さらに、リモートセンシングによる土壌水分などの立地環境の解析は、地表を覆っている植生に大きく影響を受けるため、特に地形の複雑な山岳地域での解析例はこれまでに知られていない。

このような背景に基づき、著者らは異なる2つの時期に撮影された解像度の高い空中写真を精密に補正し、これを比較解析することにより、植生変動地域の抽出及び変動域の地形的特徴の解析を行った。具体的には、ササ及びハイマツの分布拡大と移動を定量的に明らかにし、植生及び地表の表面高(DSM: Digital Surface Model, 数値表層モデル)から傾斜方向、傾斜度を算出し、低木植生の分布拡大と地形との関係を明らかにすることを目的とした。

次に、植生密生域における、マイクロ波後方散乱係数を用いた広域土壌水分の季節変化を抽出する手法を開発した。ここでは、常緑性植物であるササとハイマツの葉群動態の季節変化が、土壌水分の季節変動よりはるかに小さいという特性を生かした、フェノロジー(生物季節)的な差分モデルを開発し、植生変動地域の土壌水分の季節変動を推定し、それらを地図化する手法研究を行った。本稿では、これまでに公表済みの研究も含めて^{6), 11), 13)}、得られた研究成果とその有効性について解説する。

2. 研究方法

2.1 GIS を用いた空中写真判読によるササ及びハイマツの変動地域の抽出と環境要因分析

調査地は、大雪山国立公園五色ヶ原(北緯 43 度、

東経 142 度、標高約 1,700 ~ 1,800 m)の比較的緩やかな高山草原に設定した(図 1)。調査区は、500 m × 500 m の方形区を 2 か所設置し、それぞれ北方形区と南方形区とした。1977 年(9 月 25 日撮影)と 2009 年(9 月 3 日撮影)に撮影された空中写真を用い、デジタル化・幾何補正(オルソ補正)を行い、ESRI 社製 GIS ソフト ArcGIS 9.3 及び実体鏡による目視判読により、それぞれの年代のササとハイマツの分布域の抽出を行った。作成したデータの座標系は、平面直角座標系(12 系)に統一した。

さらに、2009 年度の空中写真から 50 cm のメッシュで作成した DSM データより、ササが拡大している地形の特徴を考察するために、ArcGIS を用いて、傾斜方向(8 方位)、斜度(10 度ごと)、地形情報による推定日射量(1 年のうち開始日を 120・終了日を 270、日間隔を 15、時間間隔を 0.5)を作成した。ササの分布拡大域と地形(傾斜方向、傾斜度、日射量)との関連は Manly の選択性指数¹⁴⁾を用いて解析した。

Manly の選択性指数¹⁴⁾は、通常生息地選択や資源利用に対する選択性などの統計処理によく用いる指数であり、(1)式によって計算される。

$$wi = o_i / \pi_i \quad \dots (1)$$

wi : 微地形のパラメータ i (傾斜方向、傾斜度、及び日射量)の選好性指数

o_i : ササ増加範囲 i を各微地形のパラメータ毎に計算した面積の割合

π_i : 調査地総面積における微地形パラメータ i の面積の割合

標準誤差は以下のように推定した。

$$SE(wi) = \sqrt{o_i(1 - o_i) / (u \cdot \pi_i^2)} \quad \dots (2)$$

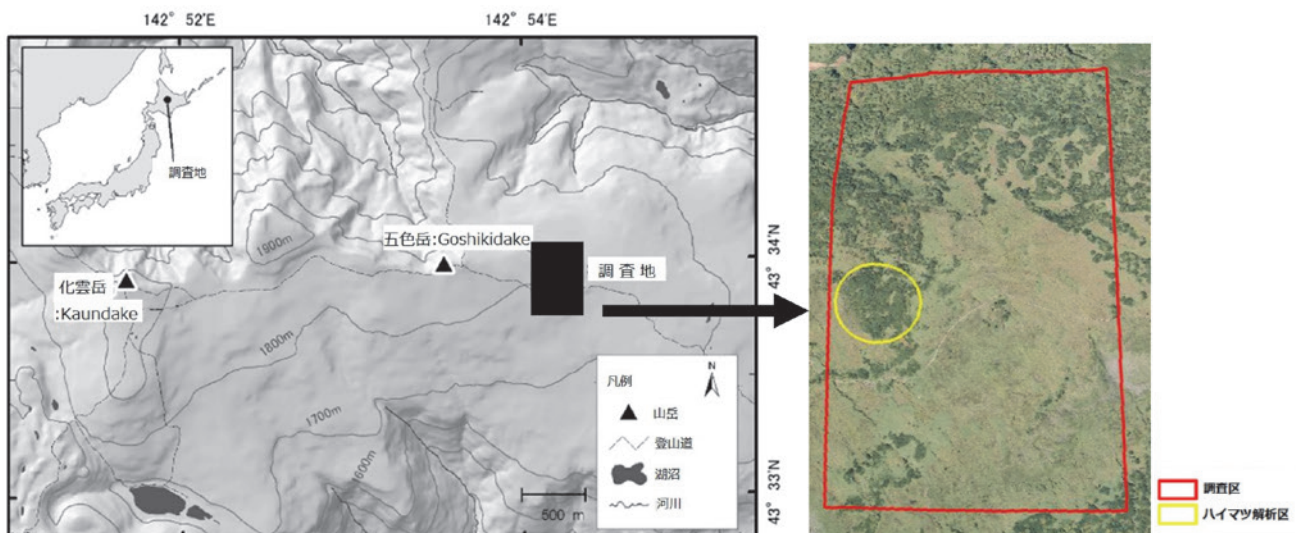


図 1 調査地(大雪山国立公園五色ヶ原)の位置図(左)と調査対象区の空中写真(右)。

u : 総面積の中でササ増加範囲毎に集計した面積の割合

95%信頼区間はボンフェローニ法¹⁵⁾を用いて得られた。

$$95\% CI = w_i \pm z_{\alpha/2} SE(w_i) \quad \dots (3)$$

α : 0.05/ 微地形パラメータのカテゴリ数
 z : 標準正規分布での正の値の α 点

微地形パラメータ i が選択された場合、以下のよう
 に判断する。ただし、信頼区間が1を含むときは、
 その微地形に対する有意な選好性はない。

下限値(Lower) ≥ 1 : 有意に選好されている
 (+と示す)

上限値(Upper) < 1 : 有意に避けられている
 (-と示す)

なお、ハイマツの分布拡大と地形との解析は、ハイマツ林分の地面高を推定することが困難であったため、行うことができなかった。

一方、ハイマツの垂直方向への伸長を解析するため、方形区中央部のハイマツ林分(図1, 面積 9,600 m²)において、1977年と2009年のハイマツ林分の樹冠上に260点のポイントを発生させ、(株)フォテック社製の画像解析ソフト StereoViewer を使用して、各年代のハイマツ樹高を求めた。次に、個々のポイントデータから三角形群を発生させ、三角形内の樹高を TIN(Triangulated Irregular Network) 法により求め、さらに10 m メッシュの格子を重ね、メッシュ内の平均樹高を算出し、この樹高の差分を求めることにより樹高伸長量の推定を行った。

2.2 植生変動地域の土壌水分の季節変動

土壌の乾燥化は、高山湿生植物群落(湿生お花畑)の消失や、ササの分布拡大の直接的・間接的原因の1つである¹⁶⁾。しかし、人工衛星や航空機からのリモートセンシングによる土壌水分の推定は、植生密生域においては地上の植物層による多重散乱光の影響で精度が低く、これまでほぼ不可能とされてきた¹⁷⁾。そこで本研究では、マイクロ波 L-Band のデータを用いて、植物の葉群層の季節動態がマイクロ波のパルスに及ぼす透過性(permeability)と干渉性(interference)の違いを利用し、植物生育期における多時期のマイクロ波の後方散乱係数を算出して、後述する方法で地表面の植生(粗度: roughness)の影響を取り除くことにより、土壌水分の季節変動の推定に成功した。土の粒子の比誘電率と水の比誘電率には大きな差があるため、土壌に含まれる水分の量が多くなると、土壌全体の比誘電率は大きくなり、結果として、後方散乱強度は強くなる。この特徴を利用し、ALOS/PALSAR の L-Band マイクロ波

高分解能モードの多偏波(HH/HV)、短偏波(HH)データを用いて後方散乱係数を算出し、同じ年の異なる季節のデータ間の差分を取り、植生の影響を取り除くことによって、観測した地域の土壌水分量を推定した。

合成開口レーダー衛星 SAR(synthetic aperture radar)のトータル後方散乱係数(σ^0)には、3つの散乱が含まれている。植物層からの散乱(σ^0_{canopy})、土壌層からの散乱(σ^0_{soil})、及び植物と土壌両方の多重散乱(σ^0_{int})であり¹²⁾、以下の式(4)で求めることが可能である。

$$\sigma^0_{dB} = \tau^2 \sigma^0_{soil} + \sigma^0_{canopy} + \sigma^0_{int} \quad \dots (4)$$

但し、 σ^0_{canopy} は植物層からの直接の後方散乱、 σ^0_{int} は植物と地表面からの多重散乱、 σ^0_{soil} は裸地における土壌水分による後方散乱、 τ^2 は植物層による(双方向の)後方散乱係数(σ^0_{dB})の減衰係数である。理論上、PALSAR(Phased-Array type L-band Synthetic Aperture)の L-Band(波長 23.6 cm, 中心周波数 1,270 MHz)は、波長が長いマイクロ波であり、樹冠を通過しやすい。PALSAR においては、後方散乱係数(σ^0_{dB})は主に σ^0_{soil} に依存し、 σ^0_{soil} は土壌水分と地表面粗度(微地形や L-Band に干渉するその他の地物)に依存する。即ち、

$$\sigma^0_{dB} = f(R, m_s) \quad \dots (5)$$

ここで、 R は地表面の粗度(roughness)(植物層や微地形など)で、 m_s は土壌水分である。植物が生えていない裸地では、式(4)は下記の式(6)のように書くことができる。

$$\sigma^0_{dB} = \sigma^0_{soil} \quad \dots (6)$$

後方散乱(σ^0_{dB})は直接土壌層からの散乱光からきており、土壌水分を表す。つまり、裸地では地表面に植物による多重散乱の影響はないため、土壌に含まれる水分の量が多くなると、土壌全体の比誘電率は大きくなり、後方散乱強度も強くなる。しかし、本研究の対象地である大雪山五色ヶ原は、高山植生が密集している地域であるため、マイクロ波が植物層に干渉し、多重散乱も起こり、正確な土壌水分の測定が困難である。そのため本研究では、植物層による L-Band マイクロ波の多重散乱を踏まえ、ハイマツ・ササと他の高山植物のフェノロジーを配慮し、下記のような仮説を立てる。常緑性のハイマツとササは密生して生えるため、マイクロ波のパルスのエネルギーを強く干渉し、植物層による多重散乱が起こる。但し、ハイマツとササの葉のバイオマスの季節変動は僅かであり、バイオマスの季節的な変化量がマイクロ波のパルスには、さほど大きな影響

を及ぼさないであろう。

このことから、同じ季節(月)、異なる2つの時期の後方散乱係数の差をとることで植生の影響(粗度: roughness)を取り除き、土壌水分の季節変化を検出することができる。式(4)を用いて、2つの時期の差分をとると、

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{dB}^0 &= (\sigma_{t2}^0 - \sigma_{t1}^0) \\ &= |\tau^2 \sigma_{soil}^0 + \sigma_{canopy}^0 + \sigma_{int}^0|_{t2} \\ &\quad - |\tau^2 \sigma_{soil}^0 + \sigma_{canopy}^0 + \sigma_{int}^0|_{t1} \quad \dots (7) \\ &= (\sigma_{soil,t2}^0 - \sigma_{soil,t1}^0) \end{aligned}$$

土壌水分の季節変化(ΔVSM)は式(8)の通りである。

$$\Delta VSM = (\sigma_{soil,t2}^0 - \sigma_{soil,t1}^0) \quad \dots (8)$$

但し、 ΔVSM は土壌水分の季節変化を示す; $\sigma_{soil,t2}^0$ 、 $\sigma_{soil,t1}^0$ はそれぞれt2時期とt1時期の土壌の後方散乱係数である。式(5)を用いて同じ季節の2つの時期のマイクロ波衛星の画像を入手すれば、植生密生地域における土壌水分の変動の推定が可能となる。

本研究では、ALOS/PALSARのL-Bandマイクロ波衛星データ、2010年の6月19日(HH単偏波)、7月6日(HH単偏波)、8月4日(HH単偏波)、8月21日(HH単偏波)、9月19日(HH単偏波)及び10月6日(HH単偏波)のL-Bandデータを用い、解析を行った。PALSARの撮影軌道は、いずれも北行軌道(Ascending orbit)である。

3. 結果と考察

3.1 GISを用いた空中写真判読によるササとハイマツの変動地域の抽出と環境要因分析

1977年と2009年のササの面積比較を行った結果、調査区全体で分布面積は25.9% (13,689 m²)増加していた(表1, 図2)。また、方形区毎に面積の増加割合を見ると、北方形区では10.9%, 南方形区では47.5%であり、南方形区でより顕著に拡大していた。

次に、ハイマツの面積比較を行った結果、ハイマツもササ同様に面積を拡大していた(表1)。調査区全体では14.4% (12,707 m²)の増加であり、ササより増加率は少ないが、増加した面積についてはササと大きな違いはなかった。方形区毎の面積の増加割合を見ると、北方形区では14.6%, 南方形区では13.9%の増加で、ササのように北方形区と南方形区で差は見られなかった。一方、方形区内の中央部に設置したハイマツ林分における平均樹高は、1977年が1.35 m, 2009年が1.59 mと、約24 cmの樹高生長が見られた(表2)。また、最大樹高も1977年が3.29 m, 2009年が3.59 mと伸長していた。次に、解析対象地域のハイマツ樹高変化を10 mメッ

表1 五色ヶ原調査区における1977年と2009年のササとハイマツの植被面積と増減率。

| | 調査区 | 1977年(m ²) | 2009年(m ²) | 増減率(%) |
|------|------|------------------------|------------------------|--------|
| ササ | 北方形区 | 31217.4 | 34613.5 | 10.9 |
| | 南方形区 | 21687.4 | 31980.2 | 47.5 |
| | 全体 | 52904.8 | 66593.7 | 25.9 |
| ハイマツ | 北方形区 | 63959.8 | 73320.0 | 14.6 |
| | 南方形区 | 24061.1 | 27408.5 | 13.9 |
| | 全体 | 88020.9 | 100728.4 | 14.4 |

表2 五色ヶ原調査区における1977年と2009年のハイマツの樹高の変化。

| | 平均樹高(m)* | 標準偏差 | 最大樹高(m)** |
|-------|----------|------|-----------|
| 1977年 | 1.35 | 1.03 | 3.29 |
| 2009年 | 1.59 | 1.04 | 3.59 |

注 * : 1977年と2009年の平均樹高の差(t検定: P < 0.001)
** : 最大樹高は調査区内抽出サンプルの最大樹高

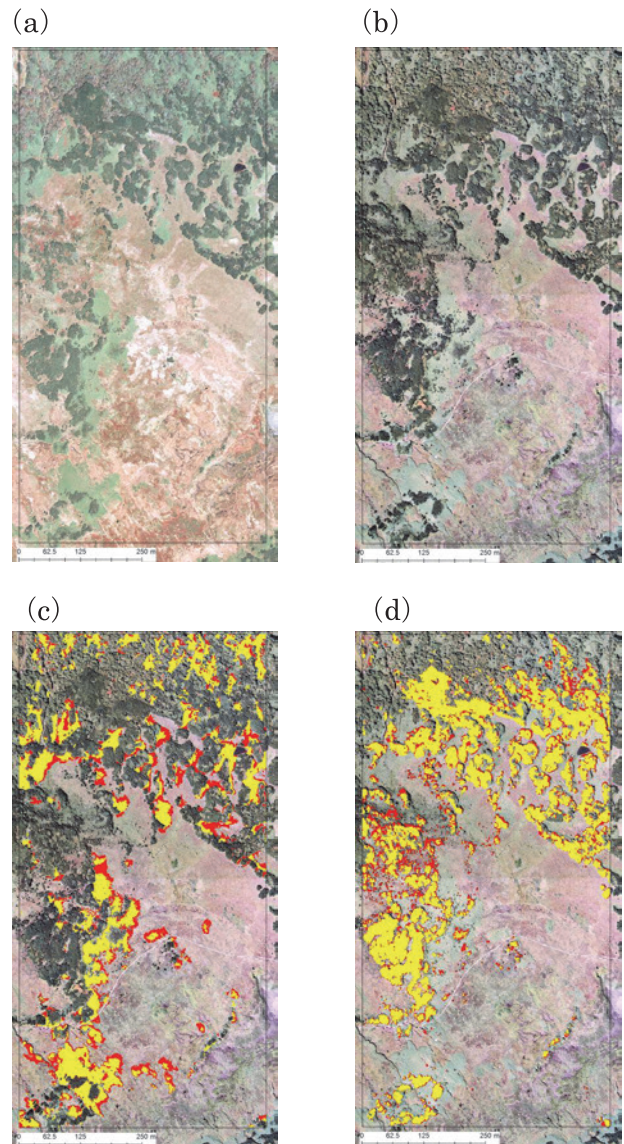


図2 五色ヶ原調査区における1977年(a)と2009年(b)の空中写真, 及びササ(c)とハイマツ(d)の分布拡大の様子。黄色: 1977年の分布, 赤: 2009年の分布。

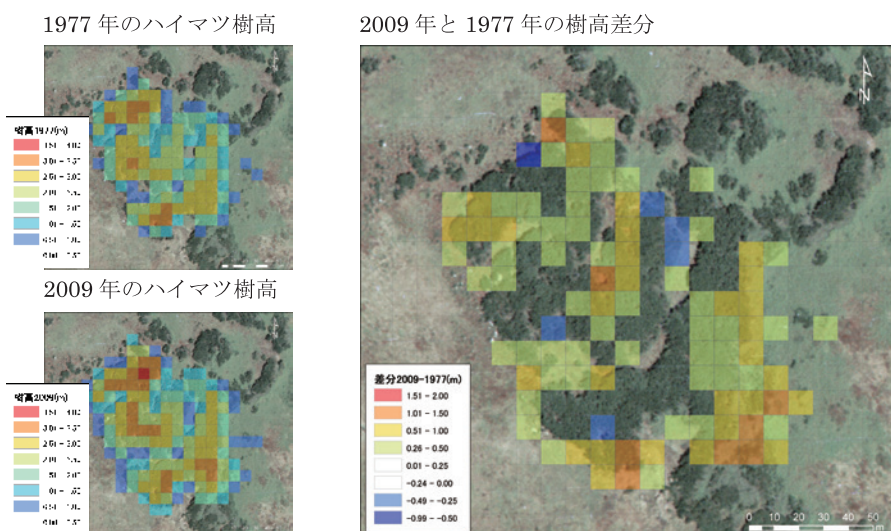


図3 五色ヶ原調査区における1977年から2009年までのハイマツ林分の樹高生長の変化。

シュで比較したところ、一部のメッシュで減少している場所が見られるものの、ほとんどのメッシュで樹高生長が確認された(図3)。特に、南東側の林縁部での生長が著しい結果となったが、これはハイマツの水平方向への伸長が一部含まれている可能性も考えられるため、今後、精査が必要である。このようにハイマツは、水平方向、垂直方向のいずれにも伸長していることが確認されたことから、ハイマツそのものの水平的な分布拡大の原因を解析することのみならず、ハイマツの樹高生長が積雪の分布や土壌水分など周囲の環境に与える影響、また、ササや高山植物の生態へ与える影響を詳細に解析する必要がある。

ササの分布拡大地域と地形及び日射量に対する選好性は、表3のとおりである。傾斜方向では、北東-南東で選好性が確認され、南西-北西を忌避していた。斜度は0-20度で選好性が確認され、20度以上を忌避していた。日射量は83 KWh/m²以上(但し、91-1,000 KWh/m²を除く)で選好され、81 KWh/m²以下を忌避していた。選好性の分析の結果、傾斜方向においてササは日当たりのよいと思われる南-西斜面ではなく、日当たりの悪いと思われる北東-南東斜面を選好していた。多雪地帯ではササは越冬する際に雪の保護を受けて、厳冬期の凍害や風、乾燥から守られる性質があるため¹⁸⁾、風の影響で北東-南東斜面では雪が吹き溜まりササは保護されるが、南西-北西斜面では雪が飛ばされ、ササが積雪によって保護されない。そのために北東-南東斜面へ分布を拡大した可能性があるかと推定されるが、今後、積雪及び融雪に関する詳細なデータが必要である。また、星野ら¹³⁾ではササの分布拡大が南西-西側斜面に見られるとの結果であったが、空中写真の解像度が本研究より荒いため精度の誤差による違いか、同一の場所による解析ではないため、風雪の条件が異なっていることが考えられる。日射量においては、83-91 KWh/m²で選好されたこと

表3 Manlyの選択性指数¹⁴⁾により示されたササの環境要因に対する選択性。

| 環境 | 選択性+ (選好) | 選択性- (忌避) |
|------------------------------|---|---|
| 傾斜方向 (度) | 北東(22.5 - 67.5) 東(67.5 - 112.5) 南東(112.5 - 157.5) | 南(157.5 - 202.5) 南西(202.5 - 247.5) 西(247.5 - 292.5) 北西(292.5 - 337.5) 北(337.5 - 22.5) |
| 傾斜度 (度) | 0 - 10 10 - 20 | 30 - 40 40 - 50 50 - 60 60 - 70 70 - 80 80 - 90 |
| 日射量 (KWh/m ²) | 83 - 85 85 - 87 87 - 89 89 - 91 | 0 - 50 50 - 70 70 - 81 |

から、強い日射量の場所を好んでいるといえる。しかし、91-1,000 KWh/m²では有意な選択性がみられなかったことは、強い日射量のためササを保護している積雪が早く融雪し、その結果、凍害などを引き起こしてしまう可能性も考えられるが、検証が必要である。

3.2 広域における土壌水分の季節変動の推定

図4に、五色ヶ原地区におけるマイクロ波広報散乱係数を用いた土壌水分の季節変化(Δ VSM)を示した。青色は土壌水分の増加傾向にあることを示し、黄色は土壌水分の減少傾向にあることを示している。図4からも分かるように、五色ヶ原全体では6月から10月にかけて土壌水分は減少傾向にあり、季節の進行に伴い土壌が乾燥している。月毎の変化を見ると、6月中旬から7月中旬にかけて土壌水分が増加傾向(変化なしを含む)にある地域の面積は全体面積の67%、減少傾向にある地域は33%を占め

る。これは、気温の上昇で雪解けが加速され、土壌水分が増加したためであると考えられる。一方、8月上旬から下旬にかけて、また9月から10月にかけての時期では、土壌水分が増加傾向にある地域は49%、減少傾向にある地域は51%とほぼ同じであった。解析対象地域の土壌水分を全体的に見ると、6月から7月にかけては増加し、8月から10月にか

けてはほぼ同じ傾向にあるが、地域的に見ると、1年を通じ土壌水分が増加している地域と、減少している地域がモザイク状に配置されていることがわかる。

調査地点(図4参照)において実際に土壌水分量(体積含水率)の定点計測を行った結果、図5に示したように、どの地点でも7月から8月にかけて土壌

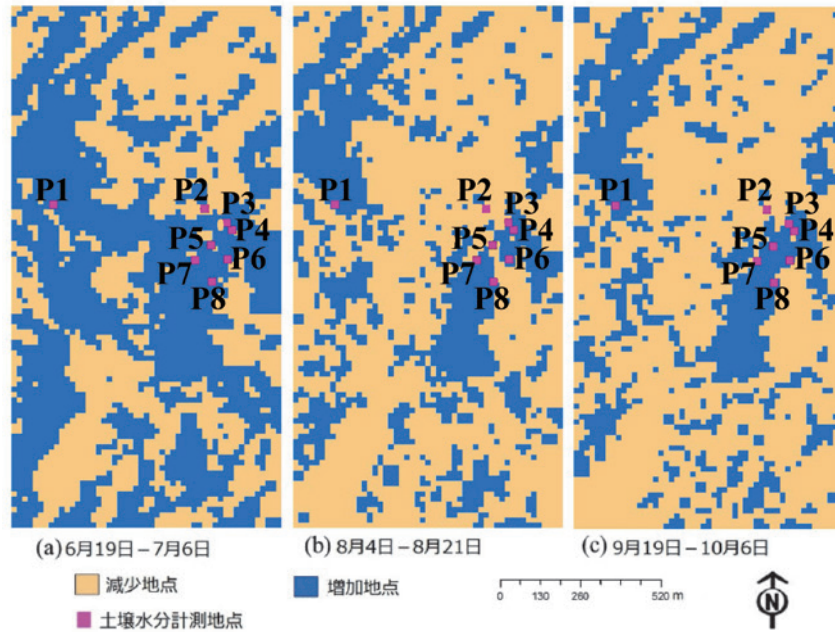


図4 五色ヶ原調査区におけるマイクロ波後方散乱係数を用いた土壌水分の季節変動の推定結果。青色は各期間において土壌水分量が増加した部分、黄色は減少した部分を示す。P1～P8は現地で土壌含水率を直接計測した測定地点を示す。

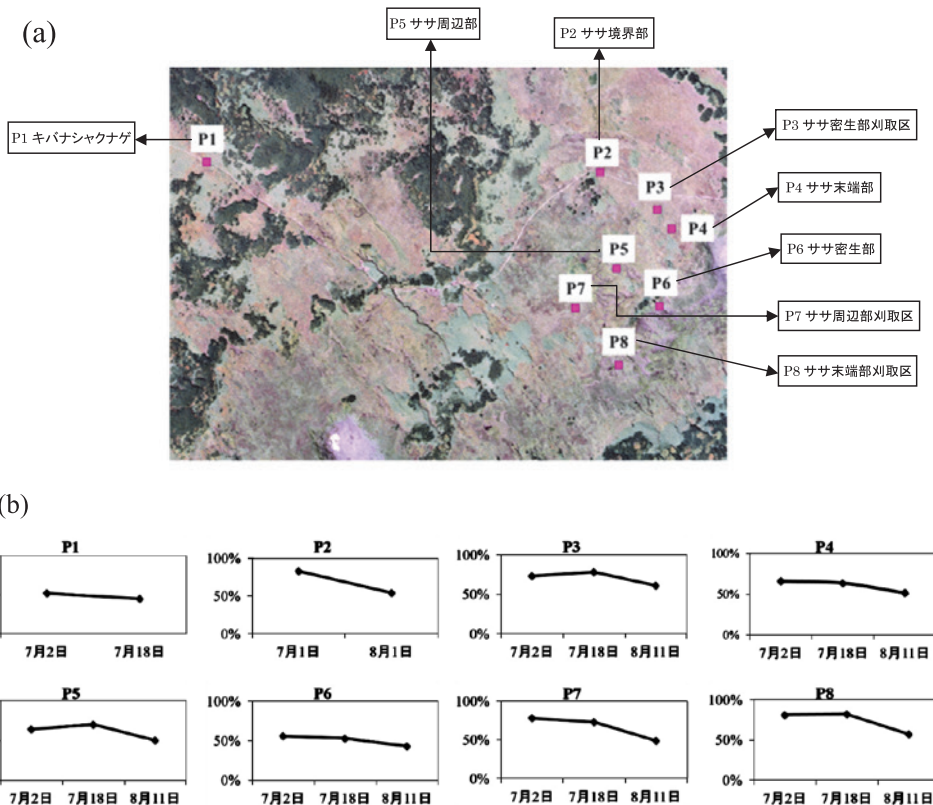


図5 現地調査による土壌水分量(体積含水率)の季節変化。(a)計測地点の分布、(b)各地点における土壌水分の平均値(計測日：7月2日、7月18日、8月11日)。

水分は減少傾向にあった。この傾向は、2.2で示した式(5)を用いた推定結果と一致した。地形・傾斜度などの影響によって雪解け水の流路となっている場所や、ササの刈取りを行った場所(P2, P3, P7, P8; ササの刈取り実験に関しては本特集, 大雪山国立公園における高山植生の変化と環境変動のセンサス(川合・工藤を参照¹⁶⁾)では、土壌水分がほかの場所より高いことが明らかになった。ササ刈取り区では、ササによる蒸発散が抑えられることによって土壌水分が高くなっていると推定される¹⁶⁾。雪解け水の流路は、季節を通して土壌水分量が比較的安定していることも分かった。

広域スケールでの土壌水分の季節変化は、雪解けが最も加速する6月~7月にかけては土壌水分が高く、その後乾燥化に転じる傾向が認められた。8月~10月には場所によってはばらつきがあるが、五色ヶ原全域で土壌の乾燥化が激しくなっていた。現地での計測結果を見ると(図4), 土壌水分の変化が最

も大きい地点はP2とP7であり、29%の減少が確認された。その次はP8の地点で、24%の減少が確認された。P3, P4, P5, P6の変化率は、12%~14%程度で、変動は小さかった。

土壌水分の季節変動に影響を及ぼす地形要因として、斜面方位と傾斜が考えられる。図4で示した土壌水分の季節的変動は、GISを用いて抽出した斜面方位を活用することによって、斜面方位、傾斜角度との関係を解析することが可能である(図6, 図7)。例えば、融雪水の影響を受ける6月下旬~7月上旬では、どの斜面方位でも土壌水分が比較的高い傾向を示すが、特に積雪量の多い南~南東斜面で土壌水分の増加割合が高い。8月~10月にかけては、土壌水分はどの斜面方位でも減少傾向を示し、特に日当たりの良い南向き斜面で顕著な減少を示した。

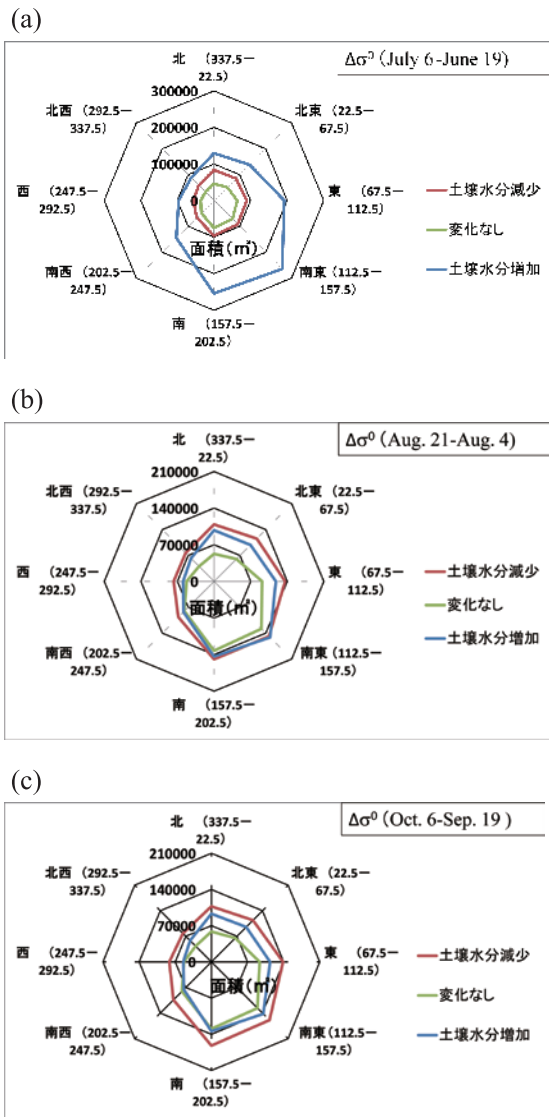


図6 土壌水分変動地域の斜面方位の分布の季節性。(a)6月6日~7月19日, (b)8月4日~8月21日, (c)9月19日~10月6日。

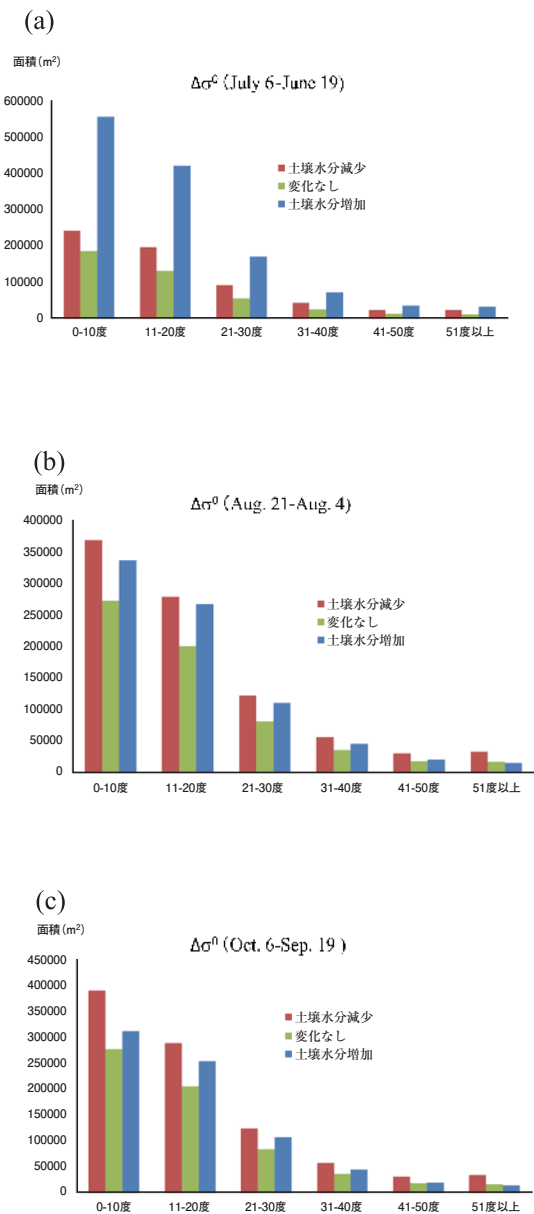


図7 土壌水分変動地域の傾斜度の分布の季節性。(a)6月6日~7月19日, (b)8月4日~8月21日, (c)9月19日~10月6日。

また、傾斜度は雪解け水の流れを左右する微地形的要因の1つである。融雪期の6月下旬～7月上旬は、どの傾斜度でも土壤水分は増加傾向を示し、特に0-20度の緩斜面で増加傾向が強かった(図6(a))。これは、融雪水がゆっくりと流れるためであろう。一方、8月～10月では、ほぼ全域で土壤水分が減少傾向にある場所の割合が大きくなっている(図6(b), (c))。特に、8月以降は傾斜30度以上の急斜面では土壤乾燥化の傾向が顕著に示された。これは、急斜面では土壤水が急速に流れてしまうためと考えられる。

4. まとめ

日本では、1940年代に米軍によって全国の空中写真が白黒で撮影され、また、1970年代に国土庁により、25,000分の1の地形図を作成する目的で、カラーの空中写真が撮影されている。この1970年代の空中写真をスキャンすると、飛行高度にもよるが、50 cm程度の高解像度の画像を得ることができる。これは、現在のGeoEye-1(GeoEye社)やWorldView-2(Digital Globe社)といった高解像度衛星の解像度と同程度である。この画像を現在のGISソフトで処理すると、精密にオルソ補正された精度の高いGISデータとして利用することが可能となる。この画像を重ねあわせることにより、約30年間の植生の長期変動を定量化し、斜面角度、斜面方位などの影響を解析できるようになった。さらに、最新の画像解析ソフトを利用し、コンピュータ上で実体視することにより、樹高情報を抽出することが可能となり、樹高変化を数十cmの単位で解析することが可能となった。

また、土壤水分の季節変動の推定の研究では、初めて植生密生地域における植生の下層にある土壤水分の季節変動の推定に成功した。この手法は、マイクロ波の後方散乱係数の差分を算出する方法であり、大雪山のように天候が不安定で晴天日の少ない地域において大変有効な手法であると示唆された。この手法により、ササの分布拡大域と土壤の乾燥化との関連性を解析することができた。このように、過去のアナログデータとデジタルデータを組み合わせ、最先端のGIS・リモートセンシング技術で処理することにより、世界でも例を見ない解析結果を得ることが可能となった。

気候変動による生物多様性のモニタリング及び対策は、環境行政にとっても最も重要なテーマであるが、本研究で得られた成果は、今後の環境モニタリングの方向を示すものと期待される。

引用文献

- 1) Chapin, F. S. III, A. D. McGuire, J. Randerson, R. Pielke Sr., D. Baldocchi, S. E. Hobbie, N. Roulet, W. Eugster, E. Kasischke, E. B. Rastetter, S. A. Zimov and S. W. Running (2000) Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system. *Global Change Biology*, 6, 211-223.
- 2) Sturm, M., C. Racine and K. Tape (2001) Climate change: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411, 546-547.
- 3) Dullinger, S., T. Dirnböck and G. Grabherr (2003) Patterns of shrub invasion into high mountain grasslands of the Northern Calcareous Alps, Austria. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35, 434-441.
- 4) Tape, K., M. Sturm and C. Racine (2006) The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*, 12, 686-702.
- 5) 工藤 岳(2014)気候変動下での山岳生態系のモニタリングの意義とその方向性. 地球環境, 19, 3-11.
- 6) Kudo, G., Y. Amagai, B. Hoshino and M. Kaneko (2011) Invasion of dwarf bamboo into alpine snow-meadows in northern Japan: pattern of expansion and impact on species diversity. *Ecology & Evolution*, 1, 85-96.
- 7) 環境省地球環境局(2008)STOP THE 温暖化 2008. 環境省.
- 8) 沖津 進(1981)ハイマツ低木林の現存量. 日本林学会北海道支部講演集, 30, 149-151.
- 9) Kajimoto, T. (1989) Aboveground biomass and litterfall of *Pinus pumila* scrubs growing on the Kiso mountain range in central Japan. *Ecological Research*, 4, 55-69.
- 10) 渡邊定元(2005)アポイ岳における高山植物群落の50(1954-2003)年間の変遷. 日本生態学会誌, 55, 105-110.
- 11) Hoshino, B., G. Kudo, T. Yabuki, M. Kaneko and S. Ganzorig (2009) Investigation on the water stress in alpine vegetation using Hyperspectral Sensors, *IGARSS*, 3, 554-556, *IEEE*.
- 12) Moran, M. S., C. D. Peters-Lidard, J. M. Watts and S. McElroy (2004) Estimation of soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30, 805-826.
- 13) 星野 弘方・工藤 岳・米森舞乃・雨谷教弘・金子 正美・矢吹哲夫(2010)山岳生態系における植生変動の定量化に関する研究-北海道大雪山系五色ヶ原を例として. 酪農学園大学紀要, 35, 47-53.
- 14) Manly, B. F. J., L. L. McDonald, D. L. Thomas, T. L. McDonald and W. P. Erickson (2002) Resource Selection by Animals: Statistical Design and Analysis for Field Studies, second edition. Springer,

Netherlands.

- 15) Bonferroni, C. E. (1936) Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità, *Pubblicazioni del R Istituto Superiore di Scienze Economiche e Commerciali di Firenze*, 8, 3-62.
- 16) 川合由加・工藤 岳 (2014) 大雪山国立公園における高山植生変化の現状と生物多様性への影響. *地球環境*, 19, 23-32.
- 17) Hoshino, B., G. Kudo, M. Kaneko, H. Taniuchi, H. Iino and T. Yabuki (2012) Estimated soil moisture in vegetated area using multitemporal multipolarization data. *IEEE IGARSS*, 654-657. DOI : 10.1109/IGARSS.2012.6351509.
- 18) Konno, Y., D. Ito, M. Shimizu and R. Doi (1990) Distribution of the genus *Sasa*, Japanese dwarf bamboo and cost of leaf support. *Bamboo Journal*, 8, 50-55.



金子 正美

Masami KANEKO

1957年北海道赤平市生まれ。学術修士(北海道大学)。1985年より北海道生活環境部において北海道環境白書、環境管理計画、環境情報システムを担当。

1993年より北海道環境科学研究センターにおいてGISを活用した自然環境情報システムの構築を手がける。2001年より酪農学園大学教授。専門は、環境情報システムの構築、GISを活用した自然環境評価。

現在、マレーシアボルネオ島サバ州において、自然環境と経済の調和を目指した「キナバタンガン川下流域の生物多様性保全のための住民参加型村おこしプロジェクト」を実施中。



星野 仏方

Buho HOSHINO

1964年中国内モンゴル生まれ。理学博士(中国科学院)。1987年内モンゴル師範大学地理学部卒業後、中国科学院准教授、北海道大学(JSPS)特別研究員、北海道環境科学研究センター特別研究員

などを経て現在、酪農学園大学教授。専門分野はリモートセンシング・野生動物の衛星追跡及び資源保全学である。衛星画像を活用したモンゴルにおけるハタネズミの生態特性の解明、チベット高原におけるチルールのGPS追跡、スーダンにおける外来植物メスキートの分散過程の解析などに取り組んでいる。



雨谷 教弘

Yukihiro AMAGAI

1987年茨城県出身。北海道大学大学院環境科学院博士課程在学中。学術修士(北海道大学)。酪農学園大学在学中に山とGISに興味を持っていたため、チシマザサとハイマツの分布を定量化する研究を開始。

現在、北海道大学において「高山帯における植生変化の定量化とメカニズムの解明」というテーマに基づき、過去の植生データも利用した高山植物の分布変化の定量化、気候に対するハイマツの応答等、高山植物の分布変化と気候要因の関係について研究を行っている。