

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

星野 弘方¹⁾・工藤 岳²⁾・米森 舞乃¹⁾・雨谷 教弘¹⁾
金子 正美¹⁾・矢吹 哲夫¹⁾

Quantitative Studies on vegetation changes in Mountain Ecosystems
— Case study of Taisetsuzan National Park of Hokkaido, Japan

Buho HOSHINO¹⁾, Gaku KUDO²⁾, Maino YONEMORI¹⁾, Yukihiro AMAGAI¹⁾,
Masami KANEKO¹⁾ and Tetsuo YABUKI¹⁾
(Accepted 22 July 2010)

1. はじめに

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⁾。近年、北海道大雪山系の雪解け時期は年々早まっており²⁾、雪解けの早期化が土壤乾燥化を進行させササが分布拡大しやすい環境を作り、ササの侵入と乾燥化によって高山植生は急速に衰退することが危惧されている。高地・低温・多雪・強風の高寒冷環境にある北海道大雪山系は、風向・風速と地形の違いから生じる積雪量の違いによって、風衝地と雪田という対照的な2つの環境に分かれ、地表面の植生が異なっている。風衝地と雪田で、積雪量及び雪解け時期の場所間変動が異なることで、多くの固有種を含む特有な高山植物群集を形成している³⁾。この特有で厳しい気候環境下に成立している山岳生態系は地球温暖化・乾燥化等の環境の変化に極めて脆弱であり、雪解け時期の早期化は、土壤の乾燥化や温度上昇を加速させ、高山植物分布域が衰退し、チシマザサなど非高山特有植物が次第に高山帯へ侵入を拡大している。しかし、ササがどのような場所でどの程度拡大しているのかの情報はほとんどなく、その引き金となっている要因の特定も未解明である。ササの分布拡大を引き起こしている環境要因を明らかにするためには、ササ拡大域における地表面特性の解析が重要であり、特に広域における土壤水分状況の推定は不可欠である。しかし、山岳地域では晴天日が少ないため、従来の光学衛星センサを用いての植生や地表面特性のモニタリングは困難である^{4),5),6)}。さらに、

地形が複雑で植生分布が多様なため、土壤水分の広域スケールでの推定はまだ事例がない。以上の状況を踏まえ、本研究ではGISとリモートセンシング技術を駆使した、1) 植生判別と変動地域の抽出と、2) 植生変動地域の地表面特性の抽出手法についての研究を行った。

2. 研究目的

(1)目的の一つは植生判別と変動地域の抽出である。ササの高山植生への侵入が最も懸念されている大雪山五色ヶ原をモデル区とし、過去に遡って入手可能な画像資料を収集し、時系列空間データベースを構築し、植生判別を行い、植生変動地域を特定し、植生変動と関連している環境要因を定量化する；(2)もう一つの研究目的は植生変動地域の地表面特性の抽出である。山岳生態系特有の複雑な地形、複雑な植生のモザイク構造、悪天候地域における広域スケールでの土壤水分の推定手法を開発し、ササ分布拡大域における地表面特性の解析によって、五色ヶ原におけるチシマザサの高山植生への分布拡大の要因を解明することを目的とした。五色ヶ原をモデルケースとした研究手法の開発により、さらに広域かつ他地域への研究拡大への足がかりとするためのものでもある。

3. 研究対象地域

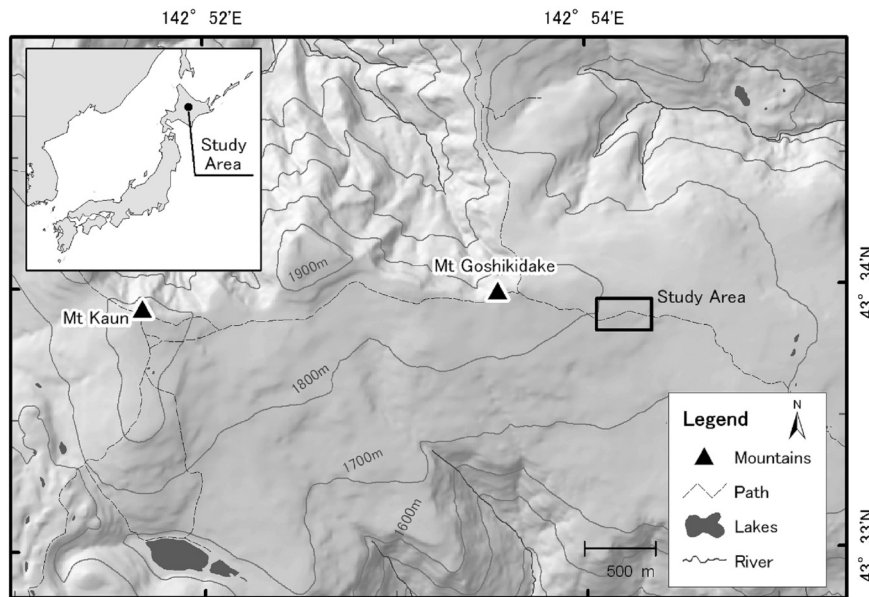
北海道中央部にある大雪山国立公園は、日本の国立公園でもっとも広く、面積約22万6千ha、南北約60 km、東西の幅は最大50 kmにわたる地域であ

¹⁾ 酪農学園大学環境システム学部生命環境学科

Department of Biosphere and Environmental Sciences, Faculty of Environment Systems, Rakuno Gakuen University, 582 Bunkyo-dai-Midorimachi, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

²⁾ 北海道大学大学院環境科学院

Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan



調査地の位置図 (大雪山・五色ヶ原)

り、大雪山の気候は寒冷で多雪な冬と、比較的温暖で湿潤な夏に特徴づけられる。本研究では大雪山五色ヶ原を調査地とした(調査地の位置図を参照)。大雪山五色ヶ原は標高約1,700~1,800 mで、北緯43度、東経142度に位置している。

4. 研究方法

4.1 植生判別と変動地域の抽出手法

大雪山五色ヶ原(標高1,700~1,800 m, 中心座標が43°34'N, 142°54'E)の中央部, 約98 haをモデル地域(調査地の位置図を参照)に選定し, 1966年, 1977年の航空写真をデジタル化し, オルソ補正を行った。また, 2008年に空中撮影した60-スペクトルバンドを持つハイパースペクトルカメラ画像(NEC)と2009年に撮影した25 cm高空間解像度の空中写真に同様のオルソ補正を行い, 精密オルソ化した時系列空間データのオーバーレイによる変化の抽出(change detection)解析を行った。航空写真のオルソ化とは, 一組のステレオ写真を用いて(1)画像中心からの距離と対象物の高さによって生じる歪みと, (2)標高差によって生じる拡大・縮小, の2つの要素を計算しながら, 組写真のどちらか一方に修正を加えて新たな画像を作成することである。2008年と2009年の航空撮影では撮影中の飛行機の位置と傾きをリアルタイムで計測するGPS/IMU(慣性計測装置)の導入により, 高精度なオルソ写真を作成すること成功したので, すべてを2009年の画像に合わせた。オルソ化した画像を用いて画像のセグメンテーションによる特徴領域の抽出とハイパースペ

クトルの特徴を利用した植生指数 $gNDVI$ によるササ分布域の抽出を行った。

$$gNDVI = \frac{G - R}{G + R}$$

G は可視光域の緑バンドの反射で, R は可視光域の赤バンドの反射である。ササは $gNDVI$ の値が最も高いところに分布する。

4.2 植生変動地域の地表面特性の抽出手法

大雪山五色ヶ原の航空写真から作成したDSM, Terra/ASTERの熱赤外データ, ALOS/PALSARのL-バンドマイクロ波高分解能モードの偏波(HH/HV)データを用いて, 地形要素, 地表面温度, 後方散乱係数などを算出し, 実測土壌水分データとの相関を調べ, 「半物理・半経験式」モデルによる土壌水分推定手法を開発した。地表面温度の推定は, ASTER Surface Kinetic Temperature (90 m)を用いた。地形図の解析は, 航空写真から作成した50 cm解像度のDSMと3 m解像度のDEMを用いた。合成開口レーダー衛星SAR(synthetic aperture radar)の後方散乱光には, 地表面におけるキャノピー, 土壌層, 及び両方の多重散乱光が含まれている⁶⁾。後方散乱係数の計算は, 下記の式を用いた。

$$\sigma_{dB}^0 = \tau^2 \sigma_s^0 + \sigma_{dv}^0 + \sigma_{int}^0 \quad (1)$$

但し, σ_s^0 は裸地における土壌水分による後方散乱信号, τ^2 はキャノピーによる(双方向の)後方散乱の減衰, σ_{dv}^0 はキャノピーからの直接の後方散乱, σ_{int}^0 は植物と地表面からの多重散乱である。理論上,

PALSAR の L-バンド (波長 23.6 cm, 中心周波数 1270 MHz) は波長が長いマイクロ波であり, キャンプーを通過しやすい。PALSAR においては, 後方散乱係数 σ_{dB}^0 は主に σ_s^0 に依存し, σ_s^0 は土壌水分と表面粗度 (微地形や L-バンドに干渉するその他の地物) に依存する⁵⁾。すなわち,

$$\sigma_s^0 = f(R, m_s) \quad (2)$$

但し, R は表面粗度 (roughness) で, m_s は土壌水分である。マイクロ波は, 地表面の比誘電率が増加すると反射されやすくなる。そのため, 土壌水分量の増加と共に, 後方散乱係数も増加する。つまり, 土壌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, それに伴って土壌全体の比誘電率は大きくなり, その結果, 後方散乱強度は強くなる。この特徴を利用し, 0-12 cm 深で実際に計測した土壌水分データ (体積含水比, HydroSense system) を用いて, PALSAR 後方散乱係数と実測土壌水分との間に以下の相関モデルを構築した。

$$\sigma_{dB}^0 = am_s + b \quad (3)$$

係数 a と b は論理的には入射角度や偏波と関連するが, 実際の計算では実測データとの相関から求めた。

使用した衛星データは: 2008 年 6 月 13 日と同年 9 月 13 日の JAXA の PALSAR データを用いた。データの受信パラメーターは表 1 で示したようである。DN から σ (dB) の抽出は下記を用いた。

データ処理レベル 1.1:

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \log_{10} \langle I^2 + Q^2 \rangle + CF - 32.0 \quad (4)$$

データ処理レベル 1.5:

$$\sigma_{dB}^0 = 10 \log_{10} DN^2 + CF \quad (5)$$

但し, CF は校正係数で, 2009 年 1 月 9 日以降に処理されたデータは -83.0 を取る。 $\langle I, Q \rangle$ は PALSAR レベル 1.1 処理データの符号付き 32 ビット浮動小数 (I, Q) である。

5. 結果・考察

(1)対象地の植生をハイマツ・ササ・高山植物・裸地に判別することに成功した (図 1-1 参照)。図 1-2 で示した範囲 (97.9 ha) では, 1977 年のチシマザサ植被面積は 8.28 ha であった。31 年後の 2008 年にササの占める面積は 14.99 ha に達しており, 拡大面積は 4.72 ha であることが分かった。すなわち過去 31 年間のササの植被面積拡大は 57%にも及んでいた。ササはももとの分布域からの拡大だけでなく, 過去には分布していなかった場所への飛び地拡大によっても生育地を広げている様子が明らかとなった。

(2)地表面温度分布ならびに地形特性: 2008 年の 9 月 20 日 (AM 10:30) の画像では, 五色ヶ原地域のササ拡大域では地表面温度は 20°C 以上の高い値を示している (図 1-3)。ササが高山植物群落に侵入している箇所の傾斜は 5.0~17.0 度の範囲にあり, その多くは斜面方位が南西~西向きに位置し, 影指標は 0.93~0.96 と非常に日当たりが良い場所に相当していた (図 1-4)。

表 1. PALSAR 高分解能モード偏波データパラメータ

Polarization	HH+HV	HH+HV
Mode	FBS8	FBS8
Data Type	Integer 16	Integer 16
PRF	2150.5 Hz	2150.5 Hz
Satellite Height	7068757 m	7068757 m
Direction	Ascending	Ascending
Pixel size	12.5 m	12.5 m
Line & Sample	2350.0 & 2800.0	2350.0 & 2800.0
Geodetic Latitude at Image Center (deg)	43.5944613	43.5944613
Geodetic Longitude at Image Center (deg)	143.0697376	143.0697376
Incidence angle	38.6613 (deg)	38.6573 (deg)
Slant	870941.3 m	870352.8 m
Acquisition date	13-6-2008, 12:47:19	13-9-2008, 12:48:05
Orbit/Frame	12712/860	14054/860
Look Direction	R	R
Look Count	4	4

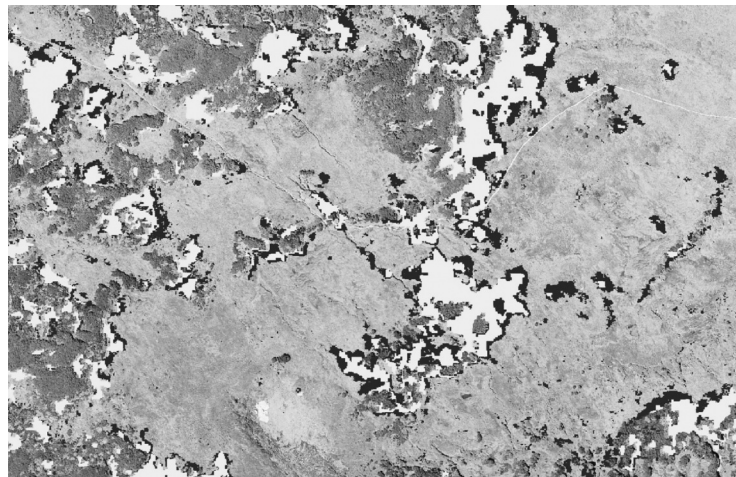


図 1-1 五色ヶ原地域における植生判別の解析例

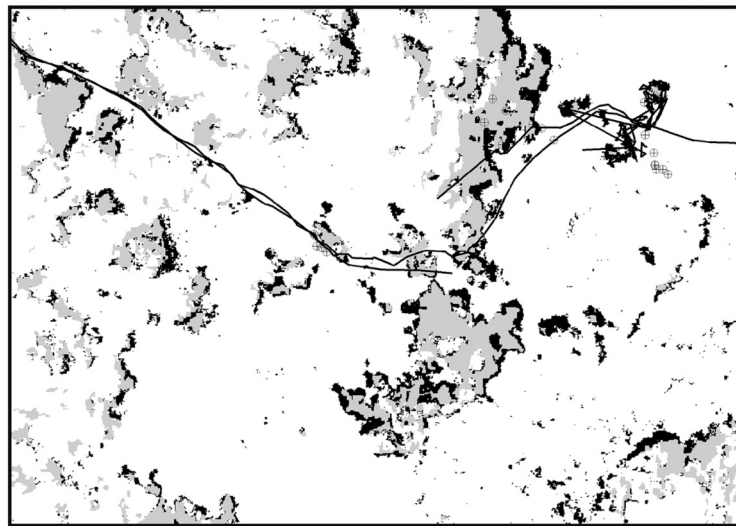


図 1-2 1977-2008 年間の笹の分布の拡大
(灰色は 1977 年の分布域, 黒色は 2008 年までに拡大した部分)

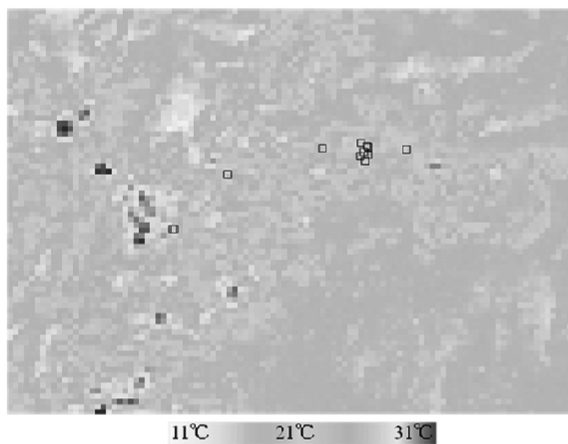


図 1-3 五色ヶ原における地表面温度の推定結果
(2008 年 9 月 20 日 AM 10 : 30)

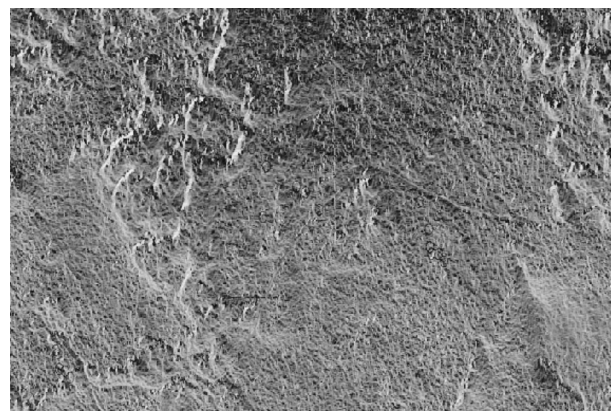


図 1-4 五色ヶ原周辺の地形特性の解析結果
(傾斜度・斜面方位・影の合成画像, 50 cm の解像度)

(3) 土壌水分の分布：調査区をササの分布密度によって、ササ密集地(ササ被度>90%)、ササ周辺部(ササ被度約55%)、ササ末端部(ササ被度約5%)とササ刈取区(ササ被度0%)に分類する。土壌水分の現地実測は2009年7月～9月の間に3回行った。ササ密集地では土壌水分が最も低く、ササ刈取区では最も高いことが示された(図1-5)。

(4) 土壌水分の実測値と PALSAR 後方散乱係数と間に図1-6のような高い正の相関が認められた。即ち、土壌水分が高い地点では後方散乱強度も高い。但し、衛星データの受信時刻と土壌水分の実測時期の間に大きい時間差があるため、今後は衛星の受信時刻に合わせて現地調査を実施し、モデルを確かめる必要がある。

PALSAR L-バンド後方散乱係数と土壌水分の実測値の間で下記のモデル式が成立した。

$$\sigma_{dB}^0 = 8.55m_s - 13.35 \quad (4)$$

この式を用いて、五色ヶ原調査区の広域土壌水分の推定を行った(図1-7)。ササ侵入している場所の土壌水分は6月では70～80%もあるが、9月になると60%以下に下がることが示された。

6. 研究の成果

(1) 科学的意義

本研究では高解像度の時系列航空写真を用いて、地形が険しく植生構造が多様な山岳地域における植生判別に成功した。過去のデータを再デジタル化し、正規化処理をすることにより、新規撮影航空写真と完全なオーバーレイ解析を行なうことができ、植生の長期変動を定量化することが可能になった。この

手法は、山岳域の森林帯の変動や高山植生動態の定量化研究の重要な手段となる。さらに、気象状況に左右されないマイクロ波衛星の後方散乱を用いての広域土壌水分の推定手法の開発は、山岳地域の調査のみならず農林業など産業へも応用できると期待される。

(2) 環境政策への貢献

人間の直接的影響のない高山生態系においても、気候変動によって急速な植生変化が生じている実態が明らかにされた。高山生態系への気候変動インパクトは、主に森林帯の上昇に伴う議論が中心になされてきたが、我が国の高山帯においては、チシマザサの分布拡大も極めて重要な要因であることを定量的に示すことができた。ササのコントロールは多くの山岳地域を有する国立公園や生態系保全地域の管理体制を考える上で、非常に重要な意味を持っていることを明らかにした。さらに今後の研究により、ササの分布拡大を引き起こしている環境要因についてのより具体的なメカニズム解明と、その対策についての提言が行えると期待できる。

謝 辞

本研究は日本科学技術振興会(JSPS)科学研究費・基盤研究(B)(課題番号:21370005,代表・工藤岳・北大准教授)と環境省・地球環境総合推進費(課題番号:D-0904・代表・工藤岳・北大准教授)の助成で行った研究成果である。現地調査に酪農学園大学・加藤勲特任教授のご指導を頂きました。ここでお礼を申し上げます。

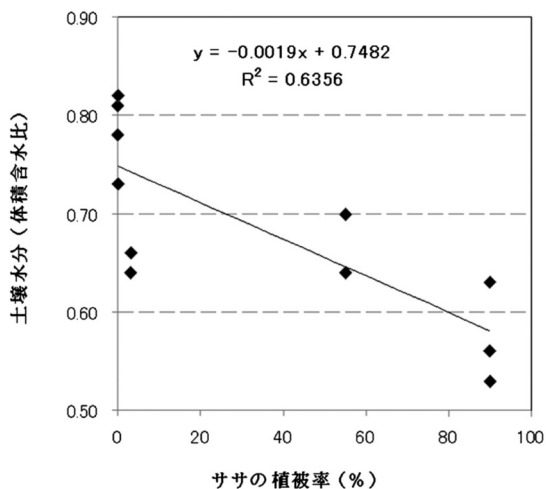


図1-5 ササの被覆率と土壌水分の計測との相関

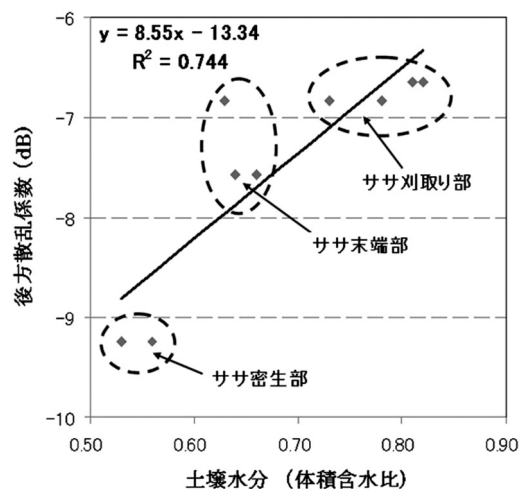


図1-6 五色ヶ原の土壌水分実測値と PALSAR 後方散乱係数との相関

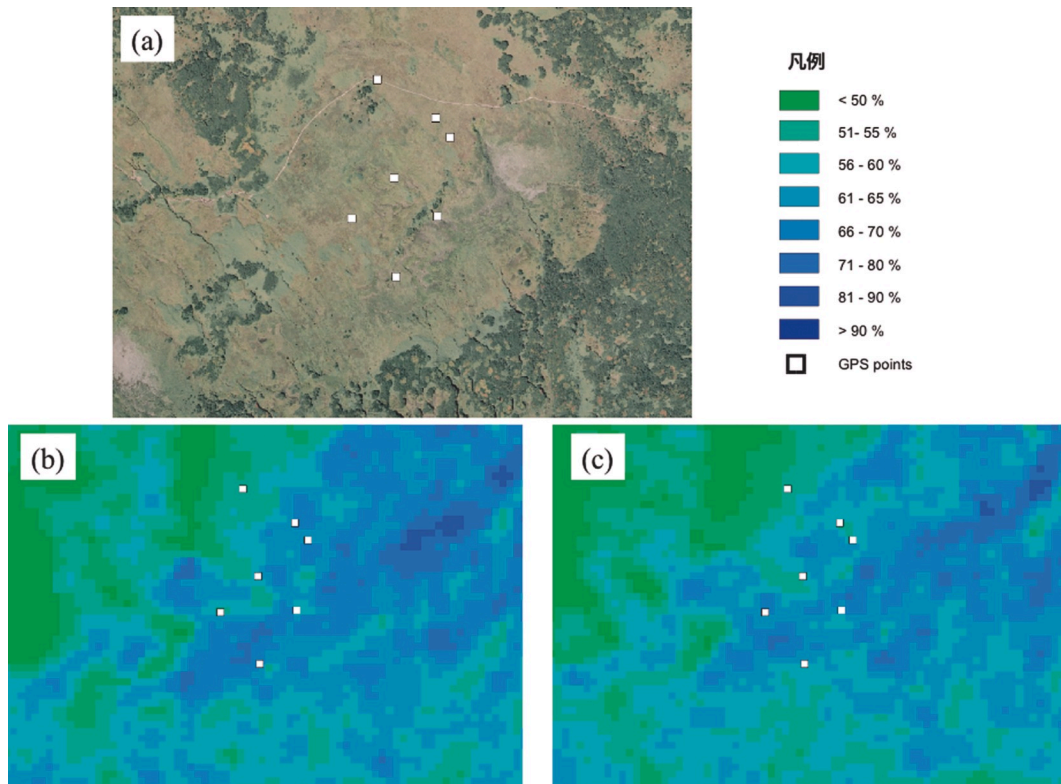


図 1-7 後方散乱係数を用いた広域土壌水分の推定。(a)調査地点の分布, (b)2008年6月13日の土壌水分, (c)2008年9月13日の土壌水分の分布。四角は土壌水分実測地点を示す。

引用文献

- 1) Chapin FS III, McGuire AD, Randerson J, et al. (2000). Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system. *Global Change Biology* 6 (1 Suppl): 1-13.
- 2) Kudo G & Hirao AS (2006) Habitat-specific responses in the flowering phenology and seed set of alpine plants to climate variation: implications for global-change impacts. *Population Ecology* 48: 49-58.
- 3) 工藤岳(2000), 大雪山のお花畑が語ること高山植物と雪溪の生態学, 京都大学学術出版会.
- 4) Aosier B, Kaneko M, Shimada S, Tsuchiya K. (2004) Estimating soil moisture in the arid and semi-arid region using Terra/ASTER data, "Participatory Strategy for Soil and Water Conservation", Edited by M. Mihara & E. Yamaji. ERECON: 197-203. ISBN 4-91617-03-8.
- 5) Niko ECV, Lievens H, Wagner W, et al. (2008) On the soil roughness parameterization

problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from Synthetic Aperture Radar. *Sensors* 8: 4213-4248.

- 6) Moran MS, Peters-Lidard CD, Watts JM, McElroy S. (2004) Estimation of soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canadian J. Remote Sensing* 30: 805-826.

要 約

気候変動に対する山岳生態系の植生変動の定量化のために、植生判別と植生変動地域の地表面特性の抽出を行った。1) 植生判別は過去と現在の時系列航空写真を用いて精密なオルソ補正を行い、1メートル高解像度の時系列空間データベースを構築し、植生変化の発見と変化地域の抽出を行った。2) 植生変動域における地表面特性の解析は、数値標高モデル、熱赤外衛星画像、マイクロ波衛星画像を用いて、植生変動域の斜面方位、傾斜度、影、地表面温度、土壌水分、植生指数(植物の光合成活性)などの指標を算出し、植生変動(特にチシマザサ分布域の変動)の要因解析を行った。北海道大雪山の五色ヶ原地域では、1977年から2008年までの31年間にサ

サの分布面積が57%増加していた。ササは斜面方位が南西～西向き、傾斜度が5-15度の日当たりが良い(影指数0.9以上)場所を中心に分布を拡大していた。熱赤外衛星データの解析から、雪解けが早く地表面温度が高い場所で特にササの分布拡大が顕著であることが示唆された。ササ密集地では土壌水分が低く、ササ前線(ササが侵入したばかりの箇所)や

高山植物分布域では土壌水分が高いことから、ササの定着によって、土壌乾燥化が加速していると考えられる。

キーワード：山岳生態系, 植生変動, 地表面特性, GIS, リモートセンシング

Abstract

High-mountain ecosystems in Japan are hotspot of biodiversity because of the existence of many endemic species and its vulnerability against climate change. We aimed to quantify recent vegetation change, clarify its mechanism, and predict global change impact on mountain ecosystems. First, we developed the methods of vegetation census using aerial photos and satellite images. In the Taisetsu Mountains of Hokkaido, dwarf bamboo extensively increased the distribution area during last 30 years. This might be related to soil aridification caused by the recent acceleration of snowmelt time. In the result, During 30 years, dwarf bamboo expanded the distribution area by 57% in the central part of Goshikigahara hotspot area. Soil water contents were low in dense bamboo patches and high in sites where bamboo did not invade, indicating that decrease in soil moisture might accelerate invasion of dwarf bamboo. Expansion of dwarf bamboo was especially prominent on south-facing steep slopes where soil tended to desiccate. This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (B) 21370005 and the Global Environmental Research Fund (D-0904) by the Ministry of the Environment, Japan.