定点カメラ観測ネットワークによる 高山帯の消雪と植生フェノロジーのモニタリング

小 熊 宏 之* 井 手 玲 子*
雨 谷 教 弘* 浜 田 崇**

Using a Time-lapse Camera Network to Monitor Alpine Vegetation Phenology and Snowmelt Times

Hiroyuki OGUMA*, Reiko IDE*, Yukihiro AMAGAI* and Takashi HAMADA**

[Received 14 February, 2018; Accepted 6 July, 2018]

Abstract

The vulnerability of alpine ecosystems to climate change, as pointed out by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and the necessity to monitor alpine zones have been recognized globally. The Japanese alpine zone is characterized by extreme snowfall, and snowmelt time is a key factor in the growth of alpine vegetation. Therefore, in 2011, the National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan, initiated long-term monitoring of snowmelt time and ecosystems in the Japanese alpine zone using automated digital time-lapse cameras. Twenty-nine monitoring sites are currently in operation. In this study, images from the cameras installed at mountain lodges in Nagano Prefecture and around Mt. Rishiri in Hokkaido are used. In addition, live camera images are obtained from cameras already operated by local governments in the Tohoku area and near Mt. Fuji. Red, green, and blue (RGB) digital numbers are derived from each pixel within the images. Snow-cover and snow-free pixels are classified automatically using a statistical discriminate analysis. Snowmelt time shows site-specific characteristics and yearly variations. It also reflects the local microtopography and differs among the habitats of various functional types of vegetation. The vegetation phenology is quantified using a vegetation index (green ratio) calculated from the RGB digital numbers. By analyzing temporal variations of the green ratio, local distributions of start and end dates and length of growing period are illustrated on a pixel base. The start of the green leaf period corresponds strongly to the snowmelt gradient, and the end of the green leaf period to vegetation type and elevation. The results suggest that the length of the green leaf period mainly corresponds to the snowmelt gradient in relation to local microtopography.

Key words : climate change adaptation, time-lapse camera, global warming, alpine monitoring, phenology, green leaf period

キーワード : 気候変動適応, 定点観測カメラ, 地球温暖化, 高山帯モニタリング, フェノロジー, 緑葉期間

* 国立研究開発法人国立環境研究所

** 長野県環境保全研究所

* National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-8506, Japan

** Nagano Environmental Conservation Research Institute, Nagano, 380-8570, Japan

I. はじめに

高山帯の生態系は気候変動の影響に対して脆弱であり (IPCC, 2007), 気温上昇や積雪量の変化による生物分布の変化や希少種の絶滅などが各地で報告されている (Lenoir *et al.*, 2008; Inouye *et al.*, 2008)。このような背景から高山帯のモニタリングの必要性は世界的な共通認識となっている。日本の高山帯の生態系は世界的にみてもきわめて多雪な環境下で成立しており, 冬季の強風で雪が吹き飛ばされほとんど無冠雪状態である「風衝地」と吹き飛ばされた雪が堆積する「雪田」という生育環境が斜面方位や微地形に応じて分布している。高山植物はその「風衝地」から「雪田」にかけた積雪傾度に沿って種ごとに適した場所で分布している (Kudo and Ito, 1992; 工藤・横須賀, 2012)。そのため, 気候変動に伴う積雪量の減少と雪融け時期の早期化は, 同域の生態系に大きな影響を及ぼすと考えられる。高山植生の生育と雪の関係については, これまでも現地観測ベースでの研究が行われてきたが (例えば, Molau *et al.*, 2005), 広範囲かつ高頻度の調査がきわめて困難であり, 対象地は限定されている。一方, 広域かつ面的な積雪・消雪の観測情報としては, 宇宙航空研究開発機構が提供している米国の地球観測衛星 Terra/Aqua に搭載された MODIS センサーを用いた日本域積雪マップ¹⁾ があげられる。毎日の積雪域および雪質データが提供されているが, 1 画素あたりの地表面の解像度が約 500 m であり, 山岳域においては 1 画素の中にさまざまな標高の情報が混入するため, 詳細な消雪過程を把握し, 植生活動と対応づけるのは困難である。他方, 地上解像度が 1 m から数 10 cm の商用衛星画像は, 観測頻度が限定されることに加え, 費用面からも日々のモニタリングに用いるのは非現実的である。気象庁では全国 323 か所での積雪の深さおよび 24 時間降雪量の測定値を公開している²⁾ が, 山岳域の測定点は存在していない。国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構ではアメダスの観測値をモデル補間し日本全国の 1 km メッシュの積雪深分布を日単位で提供している³⁾ が, おも

に農耕地での面的な積雪深分布の把握を目的としたものであり, メッシュサイズも山岳域での詳細な積雪・消雪過程の把握には不向きである。

この時間的・空間的なギャップを解消する手段として定点カメラの利用が考えられる。そこで国立環境研究所では中部山岳地域を中心に国内の高山帯への定点観測カメラの設置を進め, 消雪時期や高山植生の季節変動 (フェノロジー) の観測を開始した (小熊・井手, 2014)。これに加え, 全国各地の自然風景の最新映像の提供を目的として環境省生物多様性センターが運営しているインターネット自然研究所⁴⁾ をはじめ, 地方自治体などにより運営されているライブカメラによって, 長期間にわたる山岳域の撮影画像が保存されていることがわかった。

本稿は, 国立環境研究所が展開している高山帯モニタリングの紹介と, 既存のライブカメラによる過去からの撮影記録を活用し, 長期間かつ多地点での高山帯における消雪過程や高山植生の活動を把握する手法について述べたものである。

II. 観測方法

1) 高山帯モニタリングサイト

モニタリング対象とした山岳域の山小屋の協力を得て自動撮影カメラの設置を進めた。2009 年から立山室堂山荘での観測を開始して以来, 北アルプス, 八ヶ岳, 御嶽山, 中央・南アルプスと日本の最北端の高山帯である利尻山を対象とした国内の山岳域 31 か所における自動撮影カメラの観測を展開し, サイト統合などを経て現在 29 か所の観測を継続している。日本海に近く多雪である北アルプスの白馬岳と, 直線距離で 75 km ほど内陸に位置する乗鞍岳, さらに内陸部に位置する中央アスプスの極楽平 (木曽駒ヶ岳) では気象条件が異なり, それに伴う植生の活動や将来的な変化を観測することが重要と考えられ, 白馬から立山, 常念山脈, 槍穂高連峰そして乗鞍, 木曽駒ヶ岳まで連なる観測サイトを配置した。また, 2016 年 2 月に高山帯モニタリングに係る長野県と国立環境研究所との基本協定が締結され, これに基づいて, 噴火後の植生回復状況を長期観測する目

的で御嶽山周辺に観測点を重点的に配置した。南アルプスにおいては、ニホンライチョウ生息域の南限地帯でもある茶臼岳、上河内岳、聖岳を対象とし、南北に連なる山系の東西斜面を観測できるように、長野県と静岡県との共同研究に基づき観測点を配置した。これにより積雪状況の異なる東西斜面の面的な観測が可能となり、ライチョウの生息域モニタリングとしての活用が期待されている。

2) 定点撮影方法とデータの収集

観測カメラの運用方法は、Phenological Eyes Network (Nasahara and Nagai, 2015) やインターネット自然研究所を参考にし、設置環境や観測条件に応じて、以下に述べるカメラシステムを導入した。

まず、現地における詳細な植生調査と連動できるサイトをスーパーサイトとしてデジタル一眼レフカメラを用い、それ以外のサイトについては低温環境での動作保証がなされている監視目的用のカメラや野生動物の観察などに用いられるトレイルカメラを設置した。おおむね5時から17時までの日中1時間おきに自動的に撮影し、撮影直後に画像を国立環境研究所のサーバーに転送し、常時公開している⁵⁾。取得画像の転送は、携帯電話網や山小屋に整備されているインターネットを用いている。都市域に比べ携帯電話の電波環境が悪い山岳域においては、高解像度の画像やRAW画像の転送が困難なため、画素数を間引いたうねJPEG圧縮を施したサムネイル画像を作成・転送し、RAW画像はカメラ内部の記録媒体あるいはハードディスクに保存するシステムを開発した。さらに電波環境が悪い場合には、撮影の成否結果のみを送るサイト（爺ヶ岳）もある。これらは現地にて定期的にデータ回収を行っている。一方、北アルプス上高地周辺の山小屋ではNPO法人北アルプスブロードバンドネットワークが運営する長距離無線LANによるインターネット回線が整備されており、同法人の協力を得て画像転送を行っている。観測サイトの分布とカメラ諸元を図1と表1にそれぞれ示す。カメラごとにサイト名称を付与しており、図1の数値は表1のサイト

No. と対応させている。撮影条件の設定が可能なカメラについては、天候や日照条件などの撮影時の光環境による色調変化を抑えるために、ホワイトバランスを屋外オート、露光範囲を中央重点測光として統一した。

III. 解析方法

1) 解析データ

解析対象として、2010年前後からの国立環境研究所のモニタリングデータに加え、既存の定点カメラの撮影データを入手した（図1、表1）。標高1729 mの大山、1448 mの烏ヶ山は高山帯ではないが、過去からのデータ蓄積があり西日本を代表する山として比較対象とした。長期間にわたり観測がなされているのはインターネット自然研究所の立山、富士山、磐梯山であり2002年からのデータ蓄積がある。そのほか、秋田県由利本荘市による鳥海山⁶⁾、静岡県富士裾野市による富士山南東方面⁷⁾を加え計13か所を対象とした。用いられているカメラは30万画素程度の市販デジタルカメラをはじめとして解像度や諸元など、さらには撮影している斜面方位もさまざまであるが、長期間の消雪過程を追跡するのに支障ないと判断した。消雪過程と植生活動との関係を解析するためには植生個体が把握できる解像度が必要であり、一眼レフカメラを設置しているサイトに限定した。収集した画像データはすべてJPEG形式で、各画素に含まれる赤緑青の強度（以下「RGB値」）が256階調のデジタル値として保存されており、任意の画素や範囲におけるRGB値を抽出し、Ide and Oguma (2010, 2013) による手法を用いて消雪過程と植生活動を解析した。

2) 消雪過程の解析

山岳域では雲や霧による視程障害が頻繁に発生し、解析の誤差要因となる。雲や霧が発生すると山の稜線が不明瞭になり空と山の色が一樣になることを利用し、あらかじめ稜線を含む位置に撮影時の天候を判断するための評価領域を定めた。画像の評価領域内の赤色の出力値であるR値の相対標準偏差を算出し、経験的に決めたしきい値よりも小さい場合には雲や霧に覆われていると判定

図1 観測サイトの分布。数値は表1のサイトNo.と対応させている。

Fig. 1 Location map of time-lapse camera installation points. Numbers in Fig. 1 correspond to site numbers in Table 1.

し、その画像は解析から除外した。

次に、天空部分を除く山体の解析範囲について *RGB* 値からグレースケールのヒストグラムを求め、Otsu (1979) が示した手法により二値化することで各画素の積雪の有無を判別した。これにより対象範囲全体の画素数に対する積雪部分の画素数の割合（以下、積雪画素比）を算出することで消雪時期やパターンの年変動を数値化して比較することが可能となる。

3) 植生の解析

植生の緑葉期間の推定には、Ide *et al.* (2011) による各画素の緑色の濃さを表す指標の一つであ

る Green Ratio (*GR*) を

$$GR = G / (R + G + B) \quad (1)$$

として算出した。高等植物はクロロフィルなどの光合成色素がおもに赤と青の光を吸収して光合成に利用する。したがって、色素含量が多く光合成活性が高くなると赤や青に比べて緑の光の反射率が相対的に高くなり *GR* も高い値を示す。*GR* はこのような植物の分光反射特性に基づいて植物の光合成活動を反映する指標であり、白色の積雪面や黒色に近い地面に対しては式(1)により *GR* ≒ 0.33 を示す。

表 1 観測サイトの詳細.

Table 1 Table 1 Description of study sites.

サイト No. /実施者	サイト名称	設置場所	観測対象/斜面方位	観測 開始年	カメラ/画素数	状況	解析 対象	解析標高範囲
1/環境研	MRD：立山室堂	立山室堂山荘	立山/西斜面	2009 年	EOS5D MK II/2100 万	公開中	解析	2300-3015 m
2/環境研	CYO：蝶ヶ岳	蝶ヶ岳ヒュッテ	槍・穂高岳連峰/東斜面	2011 年	AXIS P1357/500 万	公開中	解析	2000-3190 m
3/環境研	YRE：槍ヶ岳（東方面）	槍ヶ岳山荘	常念岳，西岳，蝶ヶ岳	2011 年	AXIS P1428/800 万	公開中		
4/環境研	YRN：槍ヶ岳（北方面）	槍ヶ岳山荘	黒部五郎岳～薬師岳	2012 年	AXIS P3367/380 万	公開中		
5/環境研	KAH：涸沢ヒュッテ	涸沢ヒュッテ	涸沢カール	2011 年	AXIS P1357/500 万	公開中		
6/環境研	NSD：西岳	ヒュッテ西岳	槍ヶ岳～中岳/東斜面	2014 年	SatrDot SC/500 万	公開中		
7/環境研	RFJ：-	利尻富士町役場	利尻山/北斜面	2013 年	Blinkshot/192 万	観測中止		
8/環境研	RSH：利尻町杵形	利尻町役場	利尻山/西斜面	2013 年	AXIS P1347/370 万	公開中		
9/環境研	RHK：利尻町立博物館	利尻町立博物館	利尻山/南斜面	2013 年	AXIS P1357/370 万	公開中	解析	500-1721 m
10/環境研	ONW：鬼脇中学校	利尻町鬼脇中学校	利尻山/南東斜面	2013 年	AXIS P1357/370 万	公開中		
11/環境研	RHO：本泊旧保育所	利尻富士町旧保育所	利尻山北斜面	2012 年	Nikon D7100/2410 万	公開中	解析	500-1721 m
12/環境研	GOK：極楽平	木曽駒ヶ岳	千畳敷（極楽平）	2012 年	Nikon D7000/1600 万	公開中	解析	2650-2870 m
13/環境研	HPO：八方尾根	八方尾根	白馬三山	2012 年	AXIS P1357/500 万	公開中		
14/環境研	SRB：しらびそ高原	ハイランドしらびそ	上河内岳/西斜面	2012 年	AXIS P3367/500 万	公開中		
15/環境研	OSP：大町山岳博物館	大町山岳博物館	蓮華岳～鹿島槍	2014 年	AXIS P1357/500 万	公開中		
16/環境研	INE：松本市内	松本市征矢野	常念岳/東斜面	2014 年	AXIS P1357/500 万	公開中		
17/環境研	MNA：南岳小屋	南岳小屋	笠ヶ岳/東斜面	2014 年	AXIS P1357/500 万	公開中		
18/環境研	JIG：爺ヶ岳	種池山荘	爺ヶ岳/西斜面	2014 年	Nikon D7000/1600 万	公開中		
19/環境研*	MAR：朝日岳	乗鞍観測所	朝日岳/北斜面（乗鞍岳）	2015 年	Nikon D7000/1600 万	観測中止		
20/環境研	OTA：田ノ原	御岳観光センター	御嶽山剣ヶ峰/南東斜面	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
21/環境研	OKZ：九蔵峠	九蔵峠	御嶽山/東斜面	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
22/環境研	OIS：石室山荘	石室山荘	御嶽山剣ヶ峰 9 合目	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
23/環境研	ONY：女人堂	女人堂	御嶽山剣ヶ峰/東斜面	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
24/環境研	OMY：開田高原マイアスキー場	開田高原マイアスキー場	御嶽山継子岳/北東斜面	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
25/環境研	ORW：御岳ロープウェイセンターハウス	御岳ロープウェイセンターハウス	御嶽山/東斜面	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
26/環境研	TOM：遠見尾根	中遠見尾根	カクネ里雪溪	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
27/環境研	YHT：平沢峠	平沢峠	八ヶ岳/東斜面	2016 年	ハイクカム SP158-J 3G/130 万	公開中		
28/環境研	KAK：涸沢小屋	涸沢小屋	前穂高岳/北斜面	2012 年	StarDot SC/500 万	公開中		
29/環境研	IKW：リバウエル井川スキー場	リバウエル井川スキー場	上河内岳，聖岳/南東斜面	2017 年	ハイクカム SP4G/1200 万	公開中		
30/環境研	NKE：乗鞍観測所	乗鞍観測所	乗鞍岳剣ヶ峰/北斜面	2017 年	Nikon D7000/1600 万	公開中		
31/環境研	NHO：西穂山荘	西穂山荘	乗鞍岳，焼岳/北斜面	2017 年	AXIS P3367/380 万	公開中		
本研究で使用した環境研以外の運営によるカメラ								
インターネット 自然研究所	大雪山旭岳	旭岳ロープウェイ 姿見駅	旭岳/西斜面	2012 年	30 万	公開中	解析	1600-2291 m
由利本荘市	由利本荘市ライブカメラ	フォレスト鳥海	鳥海山/北東斜面	2009 年	80 万	公開中	解析	1400-2236 m
インターネット 自然研究所	富士北麓からみた 富士山 1	生物多様性センター	富士山/北斜面	2004 年	30 万，35 万	公開中	解析	2000-3776 m
裾野市	裾野市今日の富士山	裾野市役所	富士山/南東斜面	2012 年	120 万	公開中	解析	2000-3776 m
インターネット 自然研究所	田貫湖畔からみた 富士山	田貫湖畔	富士山/西斜面	2002 年	30 万，35 万	公開中	解析	2000-3776 m
インターネット 自然研究所	立山三山	立山自然保護センター	立山/西斜面	2004 年	30 万	公開中	解析	2300-3015 m
インターネット 自然研究所	大山鏡ヶ成からみた ウヶ山	大山鏡ヶ成	大山烏ヶ山/南東斜面	2002 年	30 万，35 万	公開中	解析	1150-1448 m
インターネット 自然研究所	大山情報館からみた 大山	大山情報館	大山/北斜面	2010 年	30 万	停止中	解析	1000-1600 m

次に対象地域におけるフェノロジーの時空間分布を調べるため、各画素について GR の時系列変化を算出した。 GR は落葉植物では開葉に伴って上昇し、紅葉・落葉による緑色の消失に対応して低下する一方、常緑植物では消雪による緑葉の露出時に急上昇し、晩秋に降雪で覆われると急低下を示した（図2）。 GR の変動から撮影時の日射条件や局所的な気象条件の影響による変動を除外して季節変動を抽出するため、シグモイド関数（成長曲線、式2）を用いて近似した（図2実線）。

$$GR(x) = p_0 + \frac{p_1}{1 + e^{(p_2 - p_3 x)}} + \frac{p_4}{1 + e^{(p_5 - p_6 x)}} \quad (2)$$

ここで x は各年の1月1日からの日数（Day of year : DOY）、 $P^0 = 0.334$ 、 $P^1 \sim P^6$ は非線形最小二乗法（レーベンバーグ・マーカート法）により決定されるパラメータを表す。さらにパラメータの適正範囲により近似の妥当性を判断した。これを x について2階微分し、 GR の変化率を求めた（図2点線）。

本研究では、落葉植物については開葉から紅葉・落葉（による緑色の消失）まで、常緑植物については消雪時の緑葉の露出から晩秋に降雪で覆われるまでの期間を緑葉期間（図2両矢印）と定義し、常緑植物、落葉植物ともに、春と秋に GR の変化率が最大になる日をそれぞれ緑葉開始日・終了日と推定した。これらの推定結果は、画像を目視して判定した緑葉開始・終了日と比較することによって検証した。

IV. 結果と考察

1) 消雪過程

積雪画素比の時系列変化から、立山（西斜面）、極楽平（東斜面）では、2016年は観測をはじめて以来もっとも消雪の進行が早く、例年に比べておおむね1か月近く早いペースで進んだが、翌2017年の消雪速度は平年並みであった（図3）。なお、積雪画素比の算出上の問題点として消雪が進行し積雪画素比が0.2以下になると積雪面と岩石・砂礫地との誤判別が生じ不確実性が増加するほか、年によっては消雪が進まず0.2以下にな

図2 (a) 落葉植物、(b) 常緑植物を含む画素における GR の季節変化と緑葉期間の推定例。片矢印は GR の最大・最小変化率から推定された緑葉開始日と終了日、両矢印は緑葉期間を表す。

Fig. 2 Examples of seasonal variations of GR in (a) deciduous plants and (b) evergreen plants. Start and end dates of green leaf period (marked with arrows) are determined by the maximum and minimum rate of increase and decrease (dotted lines), respectively, of GR fitted with a double-sigmoid curve (solid lines).

らないことが判明した。そこで、統一した基準で過去から現在までの消雪時期の経年変化を地域間で比較するため、ここでは便宜的に積雪画素比が0.2となった日の年々変動を求め、地域間の比較を行うこととした。山岳の積雪画素比を算出した範囲を図4に、標高範囲を表1にそれぞれ示す。さらに図5には積雪画素比が0.2となった日の年々変動を示す。もっとも長期間の解析ができたのは環境省のインターネット自然研究所による富士山西斜面（田貫湖からの観測）と大山烏ヶ山であり、現在まで16年間（2002～2017年）の画像蓄積がある。立山（富山県）は2004年からインターネット自然研究所が、2009年からは環境研が観測を開始した。両方とも室堂から立山の西

図3 立山と極楽平における積雪画素比の日変化。

Fig. 3 Time series of snow pixel ratio at Tateyama and Gokurakudaira.

斜面を観測し、重複期間の結果はおおむね一致しているが、観測位置がやや異なるため2010年のように一致しない年もある。富士山では3方位（北麓、南東、西）で消雪日が最大50日近い幅で変動するが、観測期間中もっとも早い消雪は西側斜面の2004年、次いで2002年、2016年となる。2016年は北・中央アルプス、富士山、大山において早い消雪となった。これは、気象庁が報道発表した、2016年冬の日本海側の降雪量は全国的に少なかった（気象庁、2016a）、その後消雪期の高温が続いた（気象庁、2016b）ことと合致するが、北海道では日本海側の利尻山も内陸の旭岳も同様の傾向がみられず、他の年でも北海道と本州の山岳とでは変動パターンが同調しないことがわかる。ここで、同じ積雪画素比となった日の残雪状態は年による違いがあるのかを調べるため、

立山と極楽平において、積雪画素比が0.2になった日の画像を比較した（図6）。同じ0.2の積雪画素比であっても残雪箇所は必ずしも一致していない。図6における2014、2015年は雪渓が徐々に融け出した7月初旬から下旬で積雪画素比は0.2になり、残雪状態も類似しているのに対し、非常に消雪が早かった2016年は、同じ積雪画素比0.2の日であっても残雪箇所は異なる。これは、季節風の風向の違いによる吹き溜まりの場所や積雪量の違いに加え、徐々に気温が上昇した消雪であるか、急激な気温の上昇や豪雨による雪崩などを伴った消雪であるかといった消雪過程の違いとも考えられ、今後の検討課題としたい。

以上の結果から、消雪時期やパターンは年による変動が非常に大きく、地域間の共通性は必ずしも明確ではなく、とくに中部山岳地域と北海道では一致しないことが明らかとなった。また、最長で16年間の観測では消雪時期の早期化・晩期化といったトレンドは見受けられず、気候変動と消雪時期の関係を把握するためにはより多地点でのモニタリングが必要である。とくに高山植物の生育の開始は消雪時期と密接に関連しているため、消雪パターンの変化は雪融け傾度に沿って生育している高山植物に対して影響を与えることが予想され、植物個体・群落の大きさに対応した解像度でモニタリングを展開することが重要である。

2) 植生フェノロジーの年変動

立山と極楽平の2か所について、画素ごとに求めたGRの変化率からフェノロジーの空間分布と年変動を画像化した（図7）。緑葉開始日を図7a、dに示す。図の赤い部分ほど緑葉開始が早く、青い部分ほど遅いことを表す。また、白色部分は8月上旬時点で残雪、あるいは無植生を表す。植生図や現地調査との対応から、植生の緑葉期間は山頂付近や地形の盛り上がった部分のハイマツ（図7a、d赤色部分）からはじまり、次にその周辺の落葉低木やササ（同黄色）、続いて緩やかな斜面の高茎草本や雪田植物（同緑色）から谷筋（同青色）へと微地形に対応した消雪に伴って徐々に拡大する過程が明らかになった。2016年は立山・極楽平ともに緑葉開始日が非常に早く、

図4 消雪解析対象範囲（赤いラインで囲った部分）.

Fig. 4 Target areas to be analyzed of snowmelt demarcated with red lines.

2014年との比較では40日以上早い部分があった。ただし一概に早いのではなく、例えばハイマツ群落であっても斜面方位や地形の違いにより10日から40日の幅をもった緑葉開始日の違いが存在していた。同様に、秋のGRの変化率から緑葉期終了日を推定すると（図7b, e）、大部分は9月末から10月初旬に枯れるもののハイマツやササでは11月に雪に覆われるまでGRの高い状態が続き、植生タイプによる緑葉期間の違いが明らかである。ここで緑葉開始日と終了日の差をとることにより、植生の年間緑葉期間（日数）を面的に算出できる（図7c, f）。その結果、1年間の緑葉期間は消雪時期や植物種の違いによって約40日間から180日間まで多様であり、同じ群

落であっても年による差があることが判明した。高山帯の低温と多雪な環境により、高山植物の生育期間は消雪時期と温度要求性によって規定される（Kudo and Suzuki, 1999; Molau *et al.*, 2005; Huelber *et al.*, 2006）。そのため、植生の緑葉開始～終了日は年・各生育環境において一様ではない。また、常緑植物においてはつねに葉が維持されるため、ここで示す緑葉期間と生育期間は必ずしも一致しない。積雪は冬季の間、高山植物を低温・強風・乾燥から保護し、その消雪傾度により消雪がおそい場所では高山植物の生育期間中、湿潤な土壤環境を維持し続ける。そのため高山植物は、消雪が早すぎると、春先の凍害のリスクが増加し（Inouye, 2008; Wheeler *et al.*, 2014）、融

雪水の供給期間が短くなるため土壌の乾燥化を起こしやすい（川合・工藤, 2014）。一方で、遅すぎる消雪は植物の生育期間を短縮させ、開花・結実の成功率を低下させる。このように、消雪の早期化、晩期化は高山植物の生育に大きく作用し、受粉を行う訪花昆虫の活動タイミングに対してずれを生じさせることも考えられる。気候変動の影響による消雪の早期化・晩期化の進行、あるいはそれらの振れ幅に対する応答や順化は植物種によってそれぞれ異なると考えられるため、将来的な保全策や域外保全などの適応策を検討するうえで、さまざまな気象条件に対する植生の応答に対する知見を蓄積していくことが重要である。

V. ま と め

山岳域に設置されたライブカメラ画像を活用し、長期間かつ広範囲の消雪過程および高山植生の活動を把握する手法について述べた。膨大な量の画像から各画素のRGB値を自動処理することで消雪過程と植生の緑葉開始日と緑葉期間を画素単位で求め、年々変動の把握を可能とした。その結果、消雪時期は年による変動が非常に大きく、それによって高山植生のフェノロジーも大きく影響を受けることが判明した。本研究で示した面的な消雪過程とフェノロジーの長期観測により変化

図5 積雪画素比が0.2となった日 (Day of year) の経年変化。

Fig. 5 Time series change on the day when the snow pixel ratio declined below 0.2.

立山(Tateyama)

極楽平(Gokurakudaira)

図6 立山と極楽平における積雪画素比が0.2となった日の観測画像。

Fig. 6 Photos taken when snow pixel ratio declined below 0.2 at Tateyama and Gokurakudaira sites.

立山(Tateyama)

極楽平(Gokurakudaira)

図7 立山と極楽平における緑葉開始・終了日、および緑葉期間の空間分布。無植生部分と積雪部分（Day of year 215時点）は白色で示す。

Fig. 7 Spatial distribution of date of start and end of green leaves, and days of green period at Tateyama and Gokurakudaira sites. Non-vegetated areas and snow-covered areas (until day of year 215) are denoted in white color.

が著しい場所を特定し、調査を強化すべき場所を絞り込むとともに保全策の検討に資することも可能であろう。

一方、最長で 16 年間分の解析結果からは、消雪時期の早期化・晩期化といったトレンドは見受けられなかった。気候変動と消雪時期の関係を把握し、同域に展開する生態系の応答や分布変化を把握するためには、より長期間かつ多地点でのモニタリングが必要であるといえる。

本研究では消雪過程を積雪と非積雪の画素数の比率で示し、便宜的に同じ閾値で山岳間や年次間の比較を行った。しかし、解析の対象範囲にはさまざまな標高や斜面方位の積雪状態が混入していることから、斜めや真横からの山岳を撮影した画像に地理情報を付与し、正射投影変換により撮影画像を地形図や等高線などの地理情報に重ね合わせ、標高別、斜面方位別に消雪時期や緑葉期間を求めることが今後の課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、立山室堂山荘と NPO 法人北アルプスブロードバンドネットワークのスタッフの方々には、画像の提供やカメラの設置などご協力いただきました。改めて皆様に御礼申し上げます。環境省生物多様性センターインターネット自然研究所および由利本荘市ならびに富士裾野市には画像の利用を快諾していただき、感謝申し上げます。

注

- 1) 日本域積雪マップ: http://www.eorc.jaxa.jp/JASMES/index_map_j.html [Cited 2018/2/10]。
- 2) 気象庁積雪の深さ一覧表: http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/snc_rct/alltable/snc00.html [Cited 2018/2/10]。
- 3) 農研機構全国農地の 1 km メッシュ積雪深分布推定モデル: http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/harc/2014/harc14_s25.html [Cited 2018/2/10]。
- 4) インターネット自然研究所: <http://www.sizenken.biodic.go.jp/> [Cited 2018/2/10]。
- 5) 地球環境研究センター温暖化影響モニタリング(高山帯): <http://db.cger.nies.go.jp/gem/ja/mountain/> [Cited 2018/2/10]。
- 6) 由利本荘市ライブカメラ: <http://foresta.pixif.jp/?right> [Cited 2018/2/10]。
- 7) 富士山ライブカメラ: <http://www.city.susono.shizuoka.jp/saijiki/> [Cited 2018/2/10]。

文 献

- Huelber, K., Gottfried, M., Pauli, H., Reiter, K., Winkler, M. and Grabherr, G. (2006): Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the Central Alps: Implications for climate warming. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **38**, 99–103.
- Ide, R. and Oguma, H. (2010): Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*, **5**, 339–347.
- Ide, R. and Oguma, H. (2013): A cost-effective monitoring method using digital time-lapse cameras for detecting temporal and spatial variations of snowmelt and vegetation phenology in alpine ecosystems. *Ecological Informatics*, **16**, 25–34.
- Ide, R., Nakaji, T., Motohka, T. and Oguma, H. (2011): Advantages of visible-band spectral remote sensing at both satellite and near-surface scales for monitoring the seasonal dynamics of GPP in a Japanese larch forest. *Journal of Agricultural Meteorology*, **67**, 75–84.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Inouye, D.W. (2008): Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology*, **89**, 353–362.
- 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. [Kawai, Y. and Kudo, G. (2014): Current changes in alpine vegetation and their impacts on biodiversity in the Daisetsuzan National Park. *Chikyu Kankyo*, **19**, 23–32. (in Japanese)]
- 気象庁 (2016a): 冬 (12～2 月) の天候. [Japan Meteorological Agency (2016a): Weather in winter (December to February). (in Japanese)] <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/stat/tenko161202.pdf> [Cited 2018/2/10].
- 気象庁 (2016b): 春 (3～5 月) の天候. [Japan Meteorological Agency (2016b): Weather in spring (March to May). (in Japanese)] <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/stat/tenko160305.pdf> [Cited 2018/2/6].
- Kudo, G. and Ito, K. (1992): Plant distribution in relation to the length of the growing season in a snowbed in the Taisetsu Mountains, northern Japan. *Vegetatio*, **98**, 165–174.
- Kudo, G. and Suzuki, S. (1999): Flowering phenology of alpine plant communities along a gradient of snowmelt timing. *Polar Bioscience*, **12**, 100–113.
- 工藤 岳・横須賀邦子 (2012): 高山植物群落の開花フェノロジー構造の場所間変動と年変動: 市民ボランティアによる長期モニタリング調査. 保全生態学研究, **17**, 49–62. [Kudo, G. and Yokosuka, K. (2012):

- Spatiotemporal variations in flowering phenologies of alpine plant communities: long-term volunteer monitoring in an alpine ecosystem. *Japanese Journal of Conservation Ecology*, **17**, 49–62. (in Japanese with English abstract)]
- Lenoir, J., Gegout, J.C., Marquet, P.A., de Ruffray, P. and Brisse, H. (2008): A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Nature*, **416**, 389–395.
- Molau, U., Nordenhall, U. and Eriksen, B. (2005): Onset of flowering and climate variability in an alpine landscape: A 10-year study from Swedish Lapland. *American Journal of Botany*, **92**, 422–431.
- Nasahara, K.N. and Nagai, S. (2015): Development of an in-situ observation network for terrestrial ecological remote sensing—The Phenological Eyes Network (PEN). *Ecological Research*, **30**, 211–223.
- 小熊宏之・井手玲子 (2014): 自動撮影カメラを用いた高山植生の季節性のモニタリング. 地球環境, **19**, 79–86. [Oguma, H. and Ide, R. (2014): Using digital time-lapse camera to monitor alpine vegetation phenology. *Chikyu Kankyo*, **19**, 79–86. (in Japanese)]
- Otsu, N. (1979): A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **9**, 62–66.
- Wheeler, J.A., Hoch, G., Cortés, A.J., Sedlacek, J., Wipf, S. and Rixen, C. (2014): Increased spring freezing vulnerability for alpine shrubs under early snowmelt. *Oecologia*, **175**, 219–229.