

高山植生による温暖化影響検出のモニタリングに関する研究

独立行政法人 国立環境研究所

生物圏環境研究領域 生理生態研究室 名取俊樹

(研究委託先)

東京大学大学院 農学生命科学研究科 大政謙次

清水 庸

静岡大学理学部 生物地球環境科学科 増沢武弘

石川県白山自然保護センター 野上達也

小川弘司

北海道環境科学研究センター 西川洋子

平成 16～20 年度合計予算額 61.302 千円
(うち平成 20 年度当初予算額 10,570 千円)

[要旨] 本プロジェクトの目的は、人間活動の影響が比較的小さい我が国高山帯において、高山植生を活用した温暖化の影響検出・把握についての重点的研究である。そこで、まず、我が国高山帯での気象の長期変化を把握するため、公表されている気象資料などをもとに検討した結果、富士山頂での年平均気温は 20 世紀後半から上昇傾向となっていた。また、中部地方から北海道までの地上 3,000m での年平均温度の長期変化については、測定場所による違いは小さく、ほぼ同様であった。雪環境については、例えば、乗鞍岳（長野県と岐阜県）での無降雪期間が、1970 年ころから徐々に長くなっていることが分かった。

我が国高山帯での地域の特徴を考慮して設置したアポイ岳（北海道）白山（石川県）、北岳（山梨県）の定点重点観測地で、ヒダカソウ、クロユリ、キタダケソウの開花日は、近年、早くなっていることが示唆された。また、白山の千蛇ヶ池雪渓の越年規模は減少傾向であった。定点重点観測地以外からの指標について、例えば、南アルプスの高山高茎草原での本プロジェクトによる植生調査の結果と過去の調査結果とを比較した結果、大きな植生変化が認められ、その主な原因として、近年高山帯へ侵入し始めたシカの食害と結論した。また、20 年以上前の文献に示されていた生育場所でのハイマツの確認調査から、ハイマツの分布南限が北上したと結論した。我が国高山帯で認められる気温上昇の原因を特定することは、現時点では、困難であるとされているものの、これらの結果を総合し、我が国高山帯の山頂や稜線付近で、強風や微地形により積雪深が制限される場所では、近年、地球温暖化の影響が表れ始めていることが強く示唆されると結論した。そして、今後の高山帯での温暖化影響モニタリングについて提案するとともに、現在、ほとんど常時観測が行われていない高山帯での雪環境の把握について、衛星データを活用した手法を検討・確立した。

[キーワード] 温暖化影響、高山帯、モニタリング、高山植物、開花時期

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による第4次評価報告書が2007年にまとめられ、政策決定者向け要約(環境省仮訳)¹⁾も公開されている。そのなかから、本プロジェクトに関連する注目すべき記述を挙げると、①地球規模および大陸規模での20世紀半ば以降に観測された世界平均地上気温の上昇のほとんどは人為起源の温室効果ガスの増加によりもたらされた可能性がかなり高い、と前回の第3次評価報告書²⁾に比べ、人為起源の可能性をより強く結論付けている。また、②「すべての大陸及びほとんどの海洋からの観測された証拠は、多くの自然システムが、地域的な気候変化、とりわけ気温上昇によって、今まさに影響を受けていることを示している」と前回の第3次評価報告書より、より明確に地球温暖化影響が表れていることを記している。しかし、一方、③大陸規模より小さなスケールの気温変化については、観測結果のシミュレーションや変化の原因を特定することは未だ困難であるとしている。しかし、我が国の場合、都市化の影響が比較的少ないと考えられる富士山頂での年平均気温が、世界の地上気温と同様に20世紀後半から上昇してきている。また、高山植生は、地球温暖化影響検出の際、外乱となる都市化の影響を比較的受け難いと考えられることや低温環境下に生育しているため、気温の上昇や消雪時期などの影響を強く受けることが知られており、温暖化影響検出のために極めて有効な指標であると考えられる。さらに、我が国高山帯においては、近年、様々な変化が観察されている。しかし、これまで、温暖化影響検出を目的とした系統だった温暖化影響モニタリング研究が十分に実施されてこなかったというのが実情である。そこで、本プロジェクトでは、高山植生を活用した温暖化の影響検出・把握についての重点的研究を行った。

2. 研究目的

IPCC第3次評価報告書に示された影響検出手順は、まず20世紀後半の気温の上昇は人為起源の変動要因と自然起源の変動要因の両者を考慮すると観測データと最も合うということ踏まえた上で、①長期間にわたる生物・物理システムの変化であり、②変化の方向は既知のメカニズムについて予測され(気温との関係が科学的に明確であること)、③さまざまな場所及びまたは地域にわたって一環している事例を収集し結論している。そこで、本プロジェクトでは、まず、富士山頂での気温資料^{3)~7)}をもとに、富士山頂での気温の長期変化の傾向を把握する。次に、富士山頂での気温の長期傾向が、富士山特有の局地的傾向かどうか確認するため、都市化の影響が比較的少ないと考えられる気象資料として、気象庁から公開されている高層気象観測資料^{8)~10)}をもとに、地上3,000mの温度の長期傾向を計算し、富士山頂での長期傾向と比較する。また、我が国高山帯の特徴として、我が国高山帯で認められる諸現象は気温ばかりでなく、雪環境の影響を強く受けていることが知られている。しかし、我が国高山帯で雪環境の長期変化を把握するために不可欠な、均質で比較可能な長期間の気象資料は、富士山頂での積雪深のデータ以外、ほとんど公表されていない(富士山頂での積雪深のデータも2005年以後公表されていない)。そこで、本プロジェクトで収集した資料のなかから、北アルプスの乗鞍岳(長野県と岐阜県)での降雪期間の経年変化(斉藤と入江2002)¹¹⁾、尾瀬(群馬県)での積雪深の経年変化、白峰での最大積雪深の経年変化(石川県白山自然保護センター 小川氏 提供)をまとめる。

次に、本プロジェクトでは、地域の特徴を考慮しながら我が国高山帯を大きく3つに分け、

それぞれの地域から、北海道地域ではアポイ岳、本州日本海地域では白山、本州太平洋地域では北岳に定点重点観測地を設定した。そして、各定点重点観測地において、温度上昇に対する反応時間などが短い、それぞれヒダカソウ、クロユリ、キタダケソウの開花時期や千蛇ヶ池雪渓（越年性雪渓である）の越年面積の調査を行った。そして、選出した指標と気象要因との関係から既存の気象資料をもとに、指標の長期変化を推定する。

定点重点観測地以外での温暖化影響を把握するため、我が国高山帯を特徴付けるハイマツに着目した。我が国でのハイマツ群落としての南限は南アルプス光岳（2,591m）であることが知られているが、それ以南にもハイマツが飛び石的に生育していることが報告されている（我が国の南限は、世界的視点からでもハイマツの南限である）。報告されているハイマツ南限域での生育確認調査は、アプローチの困難さやハイマツが生育していたと記載されている地点が山岳地であることによる不明確さから極めて困難であり、未だ詳細な確認調査が行われていない。そこで、近田（1981）¹²⁾が報告したハイマツの生育場所を探索し、ハイマツの有無の確認と植生調査を行う。また、30年ほど前に行われた一連の植生調査記録がある南アルプス中央部において植生調査を行い、過去の結果と比較・検討し、植生変化を把握する。さらに、高山帯付近での生物季節の長期観察が続けられている尾瀬（群馬県）での観察結果が報告されている一連の「尾瀬の自然保護」¹³⁾を収集し、その結果を整理する。

我が国高山帯の気候的特色から、雪環境は高山帯で認められるさまざまな現象に大きな影響を与えることが知られている。しかし、データが均質で比較可能であり、かつ長期間公表されている積雪深などのデータは、2005年の富士山頂での積雪深の観測中止以後、ほとんどないのが現状である。そのため、高山帯での雪環境（例えば積雪期間や消雪時期）の変化を把握するため、衛星データを活用する手法を探索する。

そして、これらの結果を総合し、我が国高山帯での地球温暖化の影響について判定するとともに、今後の温暖化影響モニタリングについて提案する。

3.我が国高山帯での気温及び雪環境の長期変化の把握

気象庁から公表されている富士山頂での気温資料^{3)~7)}をもとに、年平均気温と過去5年および10年の移動平均値を図3-1に示した。また、雪環境の変化を把握するため、富士山頂での積雪深資料をもとに、4、5、6各月1日の積雪深の変化を図3-2にしめした。さらに、気象庁から公表されている高層気象観測資料^{8)~10)}に着目し、そのなかから、長期間の観測データが蓄積されている輪島(石川県)、館野(茨城県)、仙台(宮城県)、札幌、根室、稚内(北海道)の7地点を選び、それぞれの地点毎に示されている850hPaと700hPaの月毎の温度と高度から、両高度の間で温度が直線的に変化していると仮定し、地上3,000mの温度を計算した。そして、計算した月毎の温度から年平均気温を計算し、富士山頂での値と共に、前後各2年の計5年の移動平均を行い、長期経年変化の傾向を調べた(データは示してない)。また、白山山麓(白峰(標高480m)と吉野(標高180m))の気温及び最大積雪深の長期経年変化(白山自然保護センター 小川氏 提供)、尾瀬山の鼻での気温及び4、5、6各月1日の積雪深(尾瀬の自然保護¹³⁾および尾瀬自然保護財団提供)、斉藤と入江(2002)¹¹⁾が報告した乗鞍岳(長野県と岐阜県)にあるコロナ観測所での降雪日の長期データをもとに、雪が降らない期間を無降雪期間として、その経年変化を図示した。

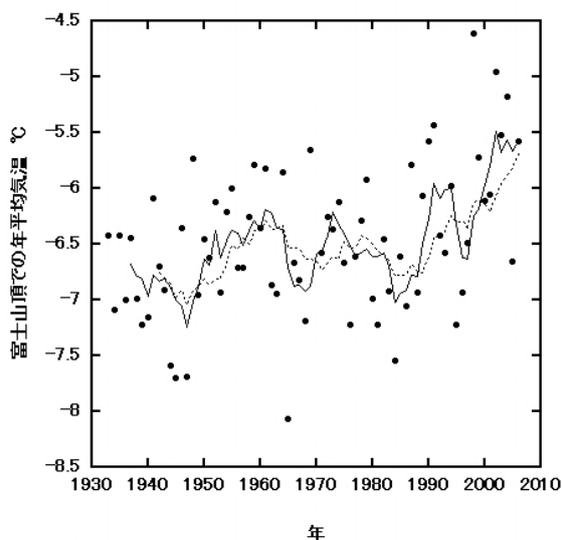


図3-1 富士山頂での年平均値の経年変化

図中の実線は過去5年間の移動平均値、破線は過去10年間の平均値を示す。データの出典は気象庁から公表されている富士山での気象資料である。

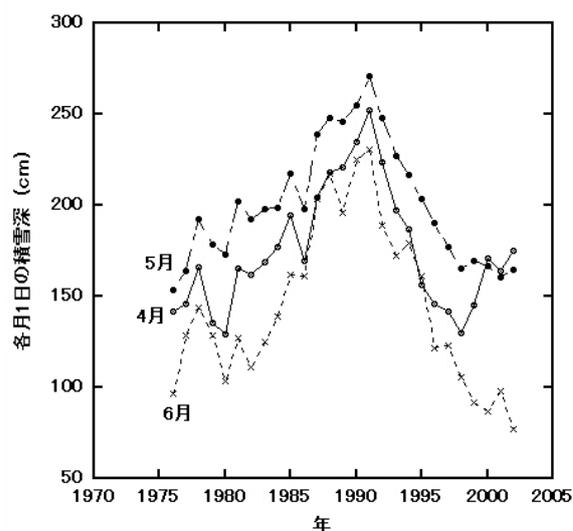


図3-2 富士山頂での4~6月の各月1日の積雪深の経年変化

図中の各線は前後各2年の移動平均値を示す。データの出典は、気象庁から公表されている富士山頂での積雪深の資料である。

その結果、富士山頂の年平均気温は、概して、20世紀後半から上昇傾向であり、また、特に、2000年前後は、年平均気温が過去5年間あるいは10年間の平均気温より高い年が多かった。しかし、ここ数年は、5年間あるいは10年間の平均気温と同程度である。また、高層気象観測資料

をもとに、計算した中部地方から北海道までの地上 3,000mの年平均気温が、富士山頂での年平均気温と良く似た長期傾向を示していることから、我が国高山帯での気温変化の長期傾向は、富士山頂での傾向とほぼ同じと言える。図 3-6 示したように、春先の積雪深は、1990 年代前半にピークがあり、それ以後、近年減少傾向となってきている。1990 年代前半以前も積雪深は近年と同様で程度であったが、年平均気温のデータ（図 3-5）とともに見ると、近年と 1990 年代前半以前の違いは、年平均気温の高低にあると言える。

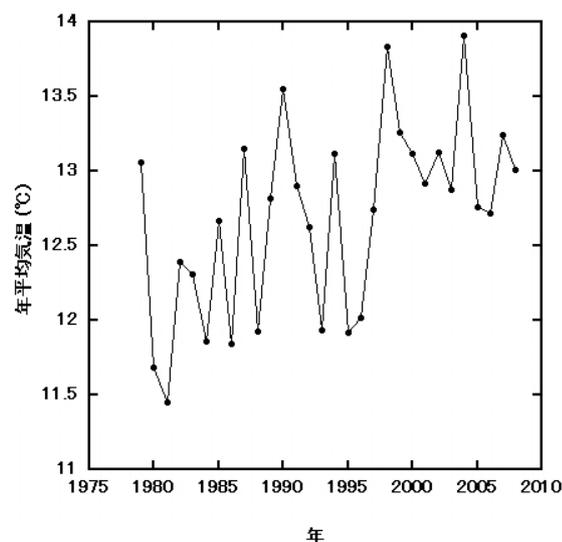


図 3-3 白山山麓吉野での年平均気温の経年変化

データは白山自然保護センター小川氏からの提供による

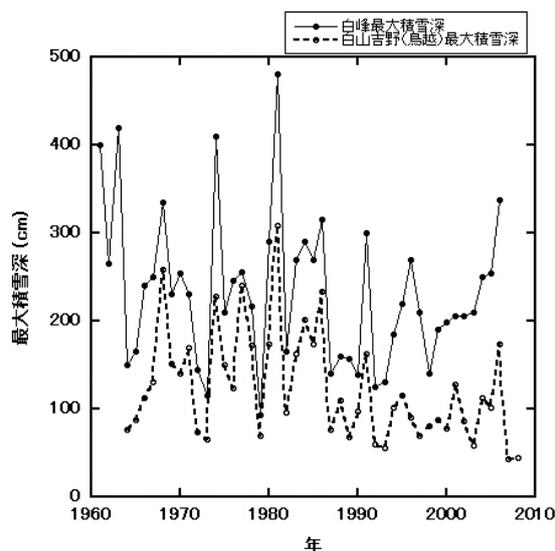


図 3-4 白山山麓での最大積雪深の経年変化

図中の黒丸実線は白峰での値を示し、白丸破線は吉野での値を示す。データは、白山自然保護センター小川氏からの提供による。

図 3-3 示したように、白山山麓吉野の年平均気温は、概して 1980 年頃から 2000 年頃まで上昇してきている。また、最大積雪深（図 3-4）は、吉野、白峰とも、概して 2000 年頃まで減少してきている。

図 3-5 に示したように、尾瀬山の鼻での春先 4 月と 5 月の月平均気温は、近年、上昇してきている。一方、春先、4 月と 5 月それぞれ 1 日の積雪深（図 3-6）については、顕著な長期傾向は認められない。しかし、見方によれば、1980 年代前半から 2000 年にかけて、増加してきていると見ることできる。

図 3-7 に示したように、乗鞍岳（長野県と岐阜県）では、概して、1970 年頃から無降雪期間が長くなってきていることが分かる。降雨が雪になるか雨になるかは、気温に影響されることは良く知られている。前記したように、中部地方から北海道までの地上 3,000mの年平均気温が良く似た傾向を示していることから、乗鞍岳で認められた無降雪期間の長期化は、中部地方から北海道までの高山帯で広く認められる可能性があるだろう。

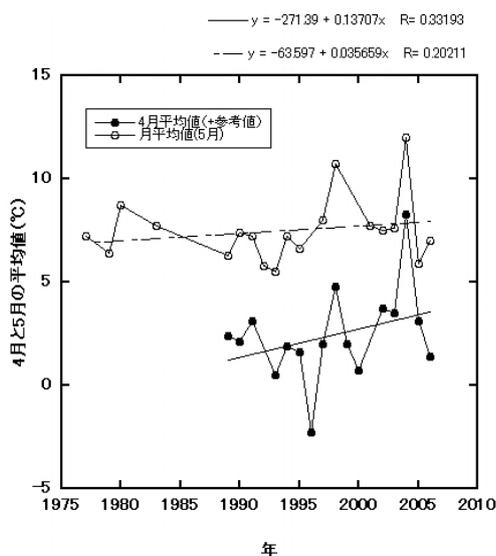


図 3-5 尾瀬（群馬県）山の鼻での 4 と 5 月の月平均気温の経年変化
 図中の黒丸は参考値を含めた 4 月の月平均気温を示し、白丸は 5 月の月平均気温を示す。データは一連の尾瀬の自然保護¹³⁾及び尾瀬保護財団からの提供による。

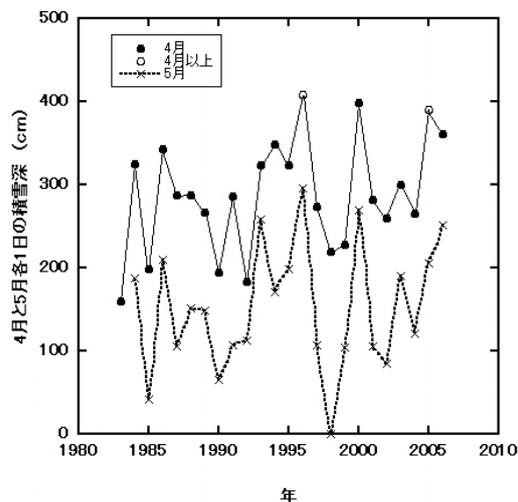


図 3-6 尾瀬（群馬県）山の鼻での 4 月と 5 月各 1 日の積雪深
 図中の黒丸は 4 月 1 日の積雪深、白丸は 4 月 1 日の積雪深で、それ以上の積雪深を示す。また、×は 5 月 1 日の積雪深を示す。
 データは、気温と同様に、一連の尾瀬の自然保護¹³⁾及び尾瀬保護財団からの提供による。

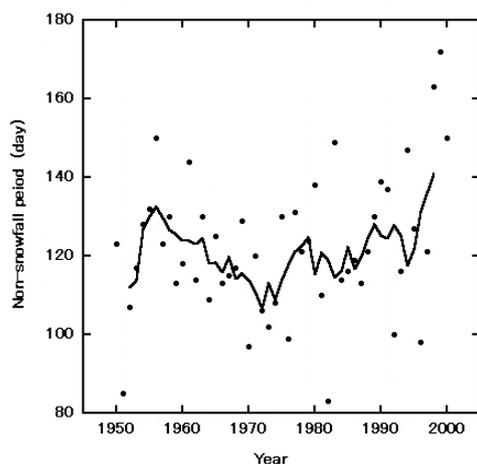


図 3-7 乗鞍岳（長野県と岐阜県）での無降雪期間の経年変化
 図中の黒丸は、斉藤と入江（2002）¹¹⁾の降雪日のデータをもとに、雪が降らない期間を無降雪期とした値を示し、実線は 5 年間の移動平均値を示す。

おわりに、IPCC 第 4 次評価報告書¹⁾では、大陸規模より小さなスケールの気温変化について

ては、観測結果のシミュレーションや変化の原因を特定することは未だ困難であると記述されている。しかし、我が国高山帯での気温は近年上昇してきている（図 3-1,3-3,3-5）。年平均気温の上昇の程度を、富士山を例として、世界の年平均地上気温、日本の年平均地上気温と比較すると、100年あたり富士山では 1.2°C （統計期間 1933～2006年）、世界の年平均地上気温では 0.67°C （統計期間 1891～2006年）、日本の年平均地上気温では 1.07°C （統計期間 1898～2006）となり、世界の年平均地上気温のおおよそ2倍弱の割合で上昇してきていることになる。一方、雪環境の変化については、図 3-2、3-4、3-6 に共通する明確な傾向は認められないが、これは、我が国高山帯での積雪深の長期記録が数少ないことに加えて、高山帯での積雪深が多く、多くの要因の影響を受けていることも一因と考えられる。例えば、①温度が上昇すると飽和水蒸気圧が増加する②温度が上昇すると雪から雨になる頻度が増加する③高山帯での積雪深は風や微地形の影響を受け、風が強く当たる場所では雪が吹き飛ばされ、風下に吹き溜まる。④傾斜が強い場所では雪崩などによっても雪が移動する。従って、風が強く当たる風衝地の積雪深は、微地形により制限される。その結果、風衝地の消雪時期は、雪が吹き溜まる谷筋に比べて、気温上昇の影響を受け易いと結論した。

4. 定点観測地 北岳(山梨県)におけるキタダケソウの満開日の経年変化

4-(1)はじめに 南アルプス北岳(山梨県)のキタダケソウについては、以前より「北岳キタダケソウ生育地保護区管理業務報告書」¹⁴⁾が毎年作成されており、そのなかでキタダケソウの開花記録が記されており、貴重な高山植物の開花記録である。そこで、キタダケソウの開花が温暖化影響の生物指標として利用できると考え、南アルプス北岳のキタダケソウ生育地を定点観測地として設定し、キタダケソウの開花時期の観察調査を行った。また、キタダケソウ生育地での気温、消雪時期などの気象要因を測定した。さらに、キタダケソウの満開日と気温上昇などの気象要因との関係を調べるため、北岳に近くで長期の気象データが蓄積されている富士山頂の気象要因との関係を調べた。まず、富士山頂と北岳との気温の関係を求めた。

4-(2)方法、キタダケソウの開花日として、以前より「北岳キタダケソウ生育地保護区管理業務報告書」¹⁴⁾作成のため現地で開花調査を行っている北岳山荘の猪俣氏の方法に従い、北岳の通称トラバース道キタダケソウ生育地の満開日の観察調査を行った。また、キタダケソウが生育している場所やその周辺に野外放置型温度計(オンセット社製 HOB0 H08-031-08)を設置し、その温度記録から消雪時期を推定した。さらに、キタダケソウの生育地に近い北岳山荘脇の百葉箱に上記温度計を設置し、気温の測定を行った。

4-(3)結果及び考察 一例として、図4-1に、キタダケソウ生育地での日平均気温の変化を示す。

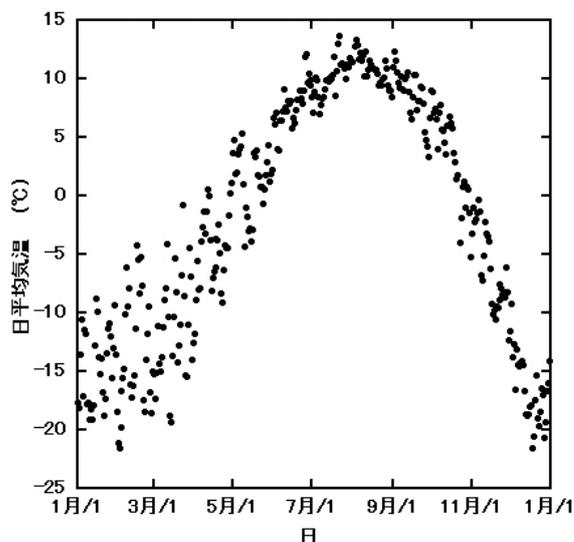


図4-1 キタダケソウ生育地での2005年の日平均気温の変化
 気温の測定は、北岳山荘(2,900m)脇の百葉箱の中に野外温度計を設置し、その温度記録から、日平均気温を求めた。

日平均気温は、冬期には -20°C 以下にまで下がり、また、夏期には高くても 15°C 以下であり、キタダケソウが低温環境下で生育していることが分かる。図4-2に「北岳キタダケソウ生育地保護区管理業務報告書」に報告されている開花記録と本プロジェクトでの開花調査の結果を合わせて、キタダケソウ満開日の経年変化を示した。キタダケソウの満開日は1990年代後半から徐々

に早まり、6月中旬までになってきていたが、ここ2年ほどは6月下旬になった。この原因として、ここ2年ほど、特に4月の気温が例年に比べて低く、例年ならば雨であるものが雪になり、消雪時期が遅れたものと推測される。

キタダケソウの開花に関する過去の資料、例えば、キタダケソウの発見者の一人である清水基夫の紀行文¹⁵⁾によると、1930年代前半には7月中旬から下旬にキタダケソウが開花していたことが記されている。また、開花個体の標本として保存されているキタダケソウの採取年月日は1930～1950年にかけて7月中旬から下旬となっている。その後、1967年に出版された植松による「南アルプスの植物」¹⁶⁾では、キタダケソウの開花が通常6月下旬～7月上旬と記されている。これらから、キタダケソウの開花が、近年徐々に早まってきていることが示唆される。

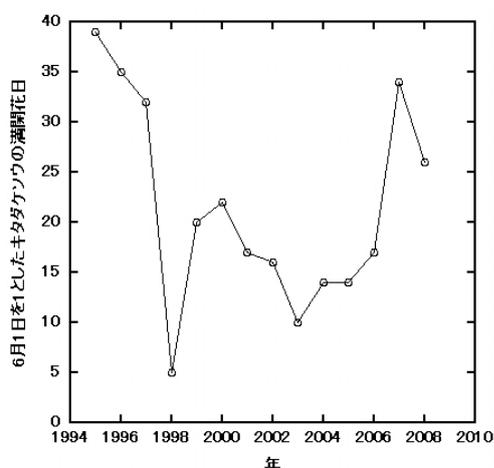


図 4-2 キタダケソウ満開日の経年変化

データは、「北岳キタダケソウ生育地保護区管理業務報告書」の開花記録と本プロジェクトでの開花調査の結果を合わせて示した。

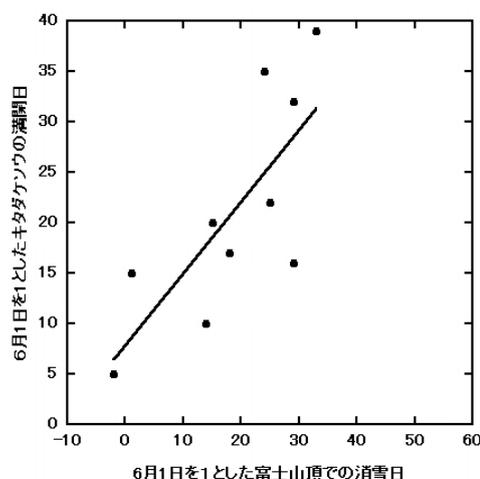


図 4-3 キタダケソウ満開日と富士山頂での消雪日との関係

キタダケソウ満開日の出典は、図 4-2 と同じであり、富士山頂での消雪日の出典は、図 3-2 と同じである。

図 4-3 に示したように、キタダケソウの満開日は富士山頂での消雪日と相関関係が認められた。ここで、気温上昇とキタダケソウの満開日に影響する気象要因について考える。3章で述べたように、高山帯での積雪深は多くの要因の影響を受けているが、キタダケソウが生育している風衝草原での消雪時期は、気温上昇の影響を受け易いと考えられる。また、春先、早く咲くキタダケソウは、消雪時期の影響を強く受けっていると推定される。

5. 定点観測地 白山（石川県）におけるクロユリと千蛇ヶ池雪溪の経年変化

（担当 石川県白山自然保護センター）

5-(1) はじめに

白山（標高 2,702m）は日本海側に位置する。冬季の大陸からの北西の季節風は日本海を渡る際に、対馬暖流から大量の水蒸気が供給され、この北西風が白山に直接ぶつかった際に雲が発生し、白山に大量の降雪をもたらす、その積雪量は場所によっては数mにおよぶ。図 3-3、3-4 に示したように、白山では、気温の上昇や積雪量の減少が懸念されている。気温の変化や積雪量の変化（積雪期間の変化）は、そこに生育、生息する動植物に大きな影響を与えると考えられ、観察されている山頂付近のチシマザサ（*Sasa kurilensis* (Rupr.) Makino et Shibata）の分布域の拡大や、低地性の植物であるオオバコの生育高度の上昇、オコジヨ（*Mustela erminea nippon* Cabrera）の白化時期の変化などがそれらの影響ではないかと懸念されている。また、気温の変化や積雪量の変化は動植物以外の影響として、越年生雪溪の越年規模に大きく影響すると考えられる。

そこで、高山植物のクロユリの開花時期や多年性雪溪である千蛇ヶ池雪溪の越年規模（面積）の経年変化について調査した。

5-(2) クロユリについて

クロユリ（*Fritillaria camtschaticensis* (L.) Ker-Gawl.）は、ユリ科バイモ属の多年生草本で、本州中部以北から北海道、千島、樺太、中国（東北）、ウスリー、カムチャッカ、北アメリカ北部に分布し（佐竹ほか，1982）¹⁷⁾、白山をその分布の西限としている（米山，1985）¹⁸⁾。白山では、標高約 2,100m 以上の室堂平周辺やお花松原周辺では大規模な群落が見られる。白山でのクロユリの開花は、7月中旬から8月下旬である（白山自然保護センター，1995）¹⁹⁾。集団内では、開花はほとんど同調し、開花時期に差がないことが明らかにされている（Yashima et al., 1997）²⁰⁾。白山では、1994年と1998年に白山の室堂平で開花時期が調査されており、1994年は7月30日～31日、1998年は6月29日～7月1日となっている。また、同年には、白山の室堂平で地表での温度計測が実施されており、そのデータから雪どけの時期が1994年は6月14日、1998年は5月17日と推定されている。これらの調査から、1998年は1994年と比較して、白山山頂部では約1か月雪どけが早まり、クロユリの開花も約1か月早まっていたことが明らかになった。しかしながら、集団内の開花がほぼ同調する開花パターンや結実率には大きな変化が見られなかった（野上，1998）²¹⁾。

5-(3) 調査方法

クロユリの調査では、白山山頂部各所での、クロユリの分布と開花、生育状況の調査（踏査調査）と、定点を決めカメラ観測等を行い、開花日を特定するとともに生育状況を記録した調査（定点調査）とを実施した。また、白山山頂付近のクロユリの主な生育地点にオンセット社の防水型温度計測ロガー HOB0 Water Temp Pro（ホボプロ水温ロガー）モデル H20-001 を設置し、地表温度を計測した（図 5-1）。また、ロガーを設置した場所を含むように、白山山頂付近のクロユリの開花状況について、7月中旬から8月上旬にかけて、ほぼ10日おきに計3～4回現地調査を実施した。そのうち、展望歩道調査地とトンビ岩コース調査地の2か所については、自動撮影カメラを設置し、写真記録を撮った。さらに、白山の夏山で解説活動を実施している石川県自然解説員研究会の方々や南竜山荘を運営する白山市地域振興公社職員に現地調査に協力してもらい、開花日を特定した。

5-(4) 結果および考察

温度計測ロガーのデータから地表面温度が変化を開始した日を消雪日として推定した。2008年に雪どけの推定日が特定できた12か所のうち、5か所は2005～2007年のデータと、1か所は2004～2007年の値と比較ができた(図5-2)。その結果、室堂調査地以外の雪どけパターンは同じで、2005～2007年に雪どけが早かったところは2008年も雪どけが早く、2005～2007年に雪どけが遅かったところは2008年も雪どけが遅かった。ただし、雪どけ日は年によって異なっており、2006年は、「平成18年豪雪」の影響で、他の年に比べ、展望歩道調査地以外では雪どけが遅れていた。一方、室堂調査地の雪どけは2005年には6月7日であったが、2006年には6月20日、2007年、2008年は6月21日となった。

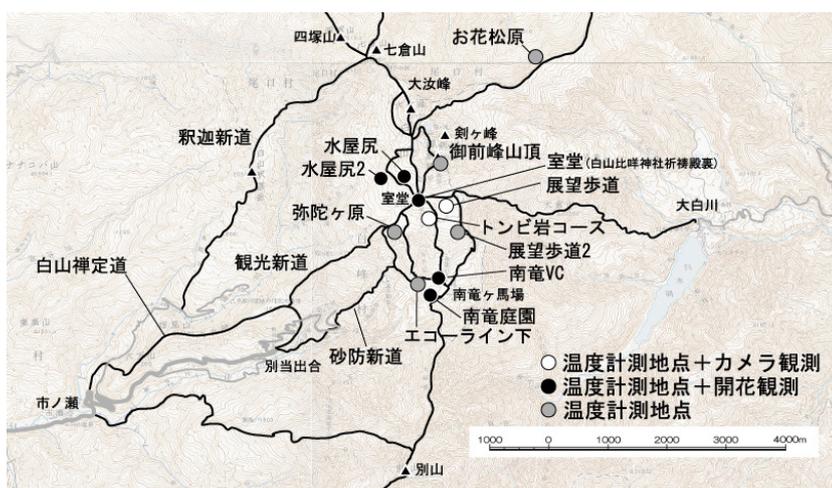


図5-1 温度計測ロガーによる地表面温度の計測場所とカメラ及び目視によるクロユリの開花調査の実施場所

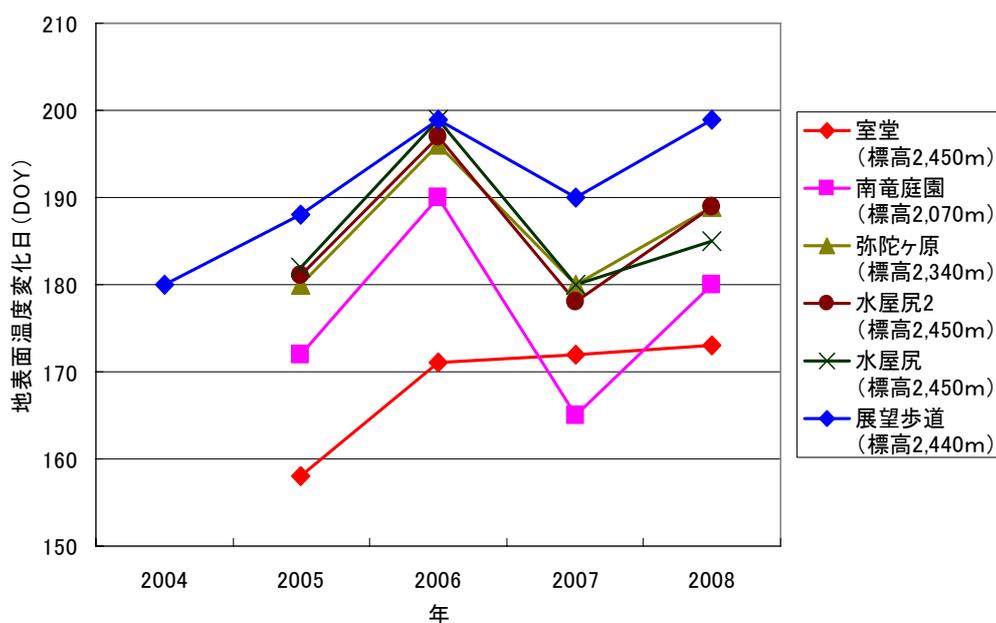


図5-2 2004年～2008年の地表面温度センサーの消雪日
DOYは1月1日を1とした時の経過日数

2005年

調査地	雪どけ 推定日	7.13~14		7.28~29	8.9~11	
室堂 (標高2,450m)	6月7日	花		花~実	実	
南竜庭園 (標高2,070m)	6月21日	つぼみ		花	花~実	
弥陀ヶ原 (標高2,340m)	6月29日	つぼみ		花	実	
水屋尻2 (標高2,450m)	6月30日	つぼみ		つぼみ~花	花	
水屋尻 (標高2,450m)	7月1日	つぼみ		つぼみ~花	花	
展望歩道 (標高2,440m)	7月7日	芽		つぼみ~花	花	

2006年

調査地	雪どけ 推定日			7.26~27	8.7~8	8.15~18
室堂 (標高2,450m)	6月20日			つぼみ~花	花~実	実
南竜庭園 (標高2,070m)	7月9日			つぼみ	花	花~実
弥陀ヶ原 (標高2,340m)	7月15日			芽	花	花~実
水屋尻2 (標高2,450m)	7月16日			芽	つぼみ	花
水屋尻 (標高2,450m)	7月18日			芽	つぼみ	花
展望歩道 (標高2,440m)	7月18日			芽	つぼみ	花

2007年

調査地	雪どけ 推定日	7.10~11	7.19~20		8.1~2		
室堂 (標高2,450m)	6月21日	芽	つぼみ~花		花~実		
南竜庭園 (標高2,070m)	6月14日	つぼみ~花	花		実		
弥陀ヶ原 (標高2,340m)	6月29日	芽	つぼみ~花		花~実		
水屋尻2 (標高2,450m)	6月27日	芽	つぼみ		花~実		
水屋尻 (標高2,450m)	6月29日	芽	芽~つぼみ		花~実		
展望歩道 (標高2,440m)	7月9日	雪どけ直後	芽		花		

2008年

調査地	雪どけ 推定日	7.7~8	7.16~17	7.29~30	8.7~8	
室堂 (標高2,450m)	6月21日	芽	つぼみ	花~実	実	
南竜庭園 (標高2,070m)	6月28日	芽	芽	花~実	実	
弥陀ヶ原 (標高2,340m)	7月7日	芽	つぼみ	花	実	
水屋尻2 (標高2,450m)	7月7日	雪どけ直後	芽	つぼみ~花	花	
水屋尻 (標高2,450m)	7月3日	雪どけ直後	芽	花	花	
展望歩道 (標高2,440m)	7月17日	積雪下	積雪下	つぼみ	花	

図 5-3 2005~2008年の白山でのクロユリ開花状況と消雪日

消雪日は、各調査地に設置した温度センサーの温度変化より推定した。調査地の位置は図1を参照。

2008年の開花状況の調査（踏査調査）からは、雪どけの推定日が早いほどクロユリの開花は早くなっている傾向は2005～2007年と同様であった（図5-3）。また、「平成18年豪雪」の影響で雪どけが遅れた2006年は他の年と比べると全体的に開花が遅くなっていた。

開花状況の調査（定点調査）では、撮影された写真データの記録や石川県自然解説員研究会の方や白山市地域振興公社職員の観察記録から開花日を特定した。撮影された写真データについては、写真撮影範囲のクロユリの花のうち、つぼみか開花かを判定できるものについて、その90%以上が開花した日を開花日とした。また、観察記録については各調査地に設定した1㎡の固定コードラート中のクロユリの開花数が90%以上となった日を開花日とした。2004年以降調査できた雪どけ推定日と開花日についての結果を表5-1に示す。2006年の開花日は、「平成18年豪雪」の影響で雪どけが遅れたため、開花も遅くなっていた。

表5-1 各調査地における雪どけ推定日とクロユリの開花日、雪どけから開花までの日数

調査年	調査地	標高	雪どけ推定日		開花日		雪どけから開花までの日数
			()は1月1日からの日数		()は1月1日からの日数		
2004	展望歩道	2,440m	2004/6/28	(180)	2004/7/25	(207)	27
2005	展望歩道	2,440m	2005/7/7	(188)	2005/8/1	(213)	25
2006	南竜庭園	2,070m	2006/7/9	(190)	2006/8/7	(219)	29
	水屋尻2	2,450m	2006/7/16	(197)	2006/8/11	(223)	26
	水屋尻1	2,450m	2006/7/18	(199)	2006/8/14	(226)	27
	展望歩道	2,440m	2006/7/18	(199)	2006/8/10	(222)	23
2007	南竜庭園	2,070m	2007/6/14	(165)	2007/7/14	(195)	30
	神社裏	2,450m	2007/6/21	(172)	2007/7/24	(205)	33
	南竜VC前	2,070m	2007/6/22	(173)	2007/7/23	(204)	31
	水屋尻2	2,450m	2007/6/27	(178)	2007/7/26	(207)	29
	水屋尻1	2,450m	2007/6/29	(180)	2007/7/29	(210)	30
	トンビ岩コース	2,410m	2007/7/5	(186)	2007/8/2	(214)	28
	展望歩道	2,440m	2007/7/9	(190)	2007/7/31	(212)	22
2008	室堂	2,450m	2008/6/21	(173)	2008/7/22	(204)	31
	南竜VC前	2,070m	2008/6/29	(181)	2008/7/22	(204)	23
	水屋尻1	2,450m	2008/7/3	(185)	2008/7/31	(213)	28
	トンビ岩コース	2,410m	2008/7/14	(196)	2008/8/5	(218)	22
	展望歩道	2,440m	2008/7/17	(199)	2008/8/5	(218)	19

表5-2 展望歩道調査地における雪どけ推定日とクロユリの開花日

	雪どけ推定日	クロユリ開花日	開花までの日数
1994年	-	7月30日	
1998年	-	6月29日	
2002年	-	7月28日	
2004年	6月28日	7月25日	27
2005年	7月7日	8月1日	25
2006年	7月18日	8月10日	23
2007年	7月9日	7月31日	22
2008年	7月17日	8月5日	19

平均 7月28日ごろ
1998年を除いた平均 8月1日ごろ

これまでの展望歩道調査地の結果をまとめる（表 5-2）と、2008 年の開花日は 8 月 1 日で、温度計測ロガーのデータによる雪どけの推定日は同年 7 月 17 日、雪どけの推定日から開花の推定日までは 19 日であった。これは 2007 年と比べると、雪どけの推定日で 8 日、開花日で 5 日遅くなっており、また、雪どけの推定日から開花日までは 3 日短くなっていた。最近の 5 年間では、クロユリの開花日は年による一定の傾向は見られなかった。

長期のクロユリ開花の変化の傾向を知るため、過去の展望歩道調査地のクロユリの開花日を、白山麓で得られる各種気象データを使い、重回帰分析を行った。その結果、白山吉野（標高 180 m 北北西微西へ約 28km）の 12-3 月降水量(mm)と 4-6 月平均気温(°C)の平年値との差を使って重回帰式を作成した場合が、最も相関が高くなり、得られた回帰式は以下のとおりであった (Adjusted R²=0.8043 P= 0.01693)。

$$\text{クロユリ開花日 (DOY)} = 0.03248 \times (\text{12-3 月降水量(mm)}) - 14.74629 \times (\text{白山吉野気温 4-6 月平年値との差 (°C)}) + 186.23153$$

この式から推定した開花日と観察された展望歩道調査地のクロユリの開花日（1994 年、1998 年、2002 年、2004～2008 年）とを比較したところ、開花日の間には最大 9 日ほどの誤差があった（表 5-3）。

表 5-3 展望歩道調査地のクロユリ開花日と推定日とその誤差

	雪どけ推定日	クロユリ開花日	白山吉野降水量 12-3 月 (mm)	白山吉野気温 4-6 月 平年値との差 (°C)	推定	
					推定開花日	誤差
1994 年	-	7 月 30 日	970	0.7	7 月 26 日	-3.1
1998 年	-	6 月 29 日	864	1.7	7 月 08 日	9.2
2002 年	-	7 月 28 日	1,189	1.0	7 月 29 日	1.7
2004 年	6 月 28 日	7 月 25 日	1,095	1.5	7 月 17 日	-7.3
2005 年	7 月 7 日	8 月 1 日	1,148	0.9	7 月 29 日	-2.5
2006 年	7 月 18 日	8 月 10 日	1,265	-0.1	8 月 16 日	6.7
2007 年	7 月 9 日	7 月 31 日	734	-0.1	7 月 30 日	-0.5
2008 年	7 月 17 日	8 月 5 日	1,001	0.3	7 月 31 日	-4.2

この式に、1979 年から吉野の気象データを代入し、展望歩道調査地のクロユリの開花日を推定した（図 5-5）。その結果は、2004 年から 2008 年にかけての開花日の変動パターンや 1998 年の開花が非常に早くなっている点などをうまく再現していた。また、標準偏回帰係数を 12-3 月降水量 (mm)と白山吉野気温 4-6 月平年値との差 (°C) について求めたところ、それぞれ 0.4526、-0.7797 となり気温のほうが影響が大きいと考えられた。

さらに 5 年移動平均の推定値から全体的な傾向を推定したところ、開花が早まってきている傾向が見られ、この約 30 年間で約 16 日開花が早まっているとの結果が得られた (R²=0.4294 P= 0.0002797)。

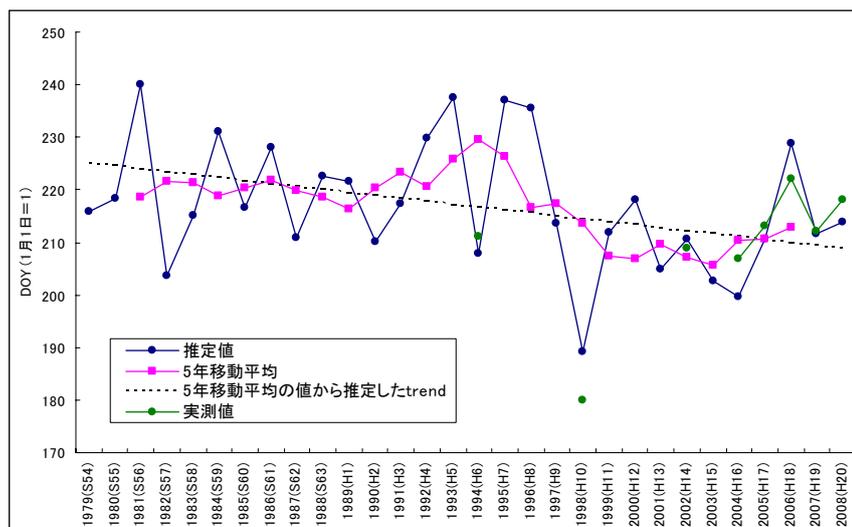


図5-5 白山吉野降水量12-3月(mm)と白山吉野気温4-6月(°C)の平年値との差で推定した展望歩道調査地のクロユリ開花日の経年変化

5-(6) 千蛇ヶ池雪渓の越年規模の測定方法

千蛇ヶ池雪渓の越年規模は、雪渓が最小となり、かつ降雪前にあたる10月中旬の面積とし、その経年変化を、レベルなどを用いた現地簡易測量(1981~1991年、1993~1997年)、雪渓規模を地図上に落とす現地観察(1992年、1998~2001年)、トータルステーションを用いた現地詳細測量(2002~2006年)、クラベス写真測量(2007~2008年)による現地調査(1981~2008年)により求めた。このなかで、新しい測量法であるクラベス写真測量について記すと、例えば2008年の10月10日に雪渓及びその周辺部で写真測量を行った(ベースマップ;1/500、コンター間隔1m)。すなわち、現地で撮影したデジタル写真データを3次元写真測量ソフトのKuraves(クラボウ社製)を用い雪渓域を抽出し、GIS上で図化し面積を求めた(図5-6)。そして、2006年の越年規模の調査時に、従来法であるトータルステーションを用いた現地詳細測量の結果と比較し、通常法で求めたデータと比較可能であると結論した。

さらに、1981年以前の越年面積を、国土地理院の空中写真、林野庁の空中写真、福井大学雪氷班の写真(一例として、写真5-1)、夏季規模からの推定(1973年、1975年、1980年)をもとに推定した。過去の空中写真については、毎年の雪渓越年規模の基準となる10月上中旬に撮影された国土地理院及び林野庁の空中写真から、写真判読と雪渓周囲の既存測量基準点(図5-7)などを基に、GIS上で雪渓域を図化し面積を求めた。雪渓越年規模(面積)を得ることができたのは、国土地理院空中写真の1961年、1977年の2年分、林野庁空中写真の1964年、1971年、1974年及び1980年の4年分の計7年である。ただし、1980年撮影の林野庁写真は9月15日の撮影であり、時期的には早い。年によっては写真が不鮮明なため、精度に問題のある年もあるが、経年変化を見る上で大きな支障はないと考えた。また、福井大学雪氷班の写真は、福井大学雪氷班(外部協力者の伊藤氏)は、1960年代後半からこの雪渓について調査をしており、現地で雪渓の周囲等を撮影した10月上中旬の写真記録が残されている。これらの写真から、雪渓の周囲に高さの違った測量基準点を設置し、これとその他の目印となる岩などの不動点などから各年の雪渓域を求め、GIS上で図化し面積を求めた。面積が得られたのは1969年、1970年、1972年、1974年、

1976年、1977年、1978年、1979年の8年である。夏季規模から越年規模の推定については、まず、8月初旬の雪渓規模を、越年規模と同様に福井大学雪氷班写真、林野庁空中写真、簡易測量、3次元写真測量により求めた。夏季規模と越年規模との関係を図7に示す。そして、融解期の雪渓規模の減少に影響を及ぼす夏季気温から推定する下式を求めた。

$$Y = 0.558X_1 - 0.014X_2 + 11.149$$

Y：千蛇ヶ池雪渓越年規模（面積）、 X_1 ：千蛇ヶ池雪渓夏季規模（面積）

X_2 ：夏期雪渓測量日と越年規模測量日間の金沢での日平均気温の積算値

$R^2 = 0.828$

この回帰式から越年規模の不明な年の越年規模を求めた。求めたのは1973年と1975年で、10月10日を越年規模の基準日として気温の積算値を与えた。結果、推定面積は1,643 m²と3,539 m²となった。また、1980年については9月15日撮影の空中写真から雪渓面積を求めていたが、これについても上記の回帰式を用い、10月10日を基準日として推定面積を求めた。その値は1,301 m²となった。

5-(7) 結果及び考察

図5-8に現地調査から得られた越年面積と過去の空中写真などから推定した越年面積を示した。その結果、1981年以後の現地調査から得られた越年面積についての回帰直線の傾きが-0.35となり、越年面積が減少傾向であることが分かった。また、現地調査のデータに過去の空中写真などから推定した越年面積を加えて回帰直線を求めたところ、傾きが-0.099となり、解析統計期間により直線の傾きは異なるものの、いずれも千蛇ヶ池雪渓の越年規模が減少傾向であることが分かった。また、ここ約30年間の減少が激しいことも分かる。雪渓の越年規模は、大きく言えば、冬季の雪の蓄積量と夏季の融雪量の差であり、融雪量は気温の影響を強く受け、地球温暖化の影響指標として、極めて有効な指標である。

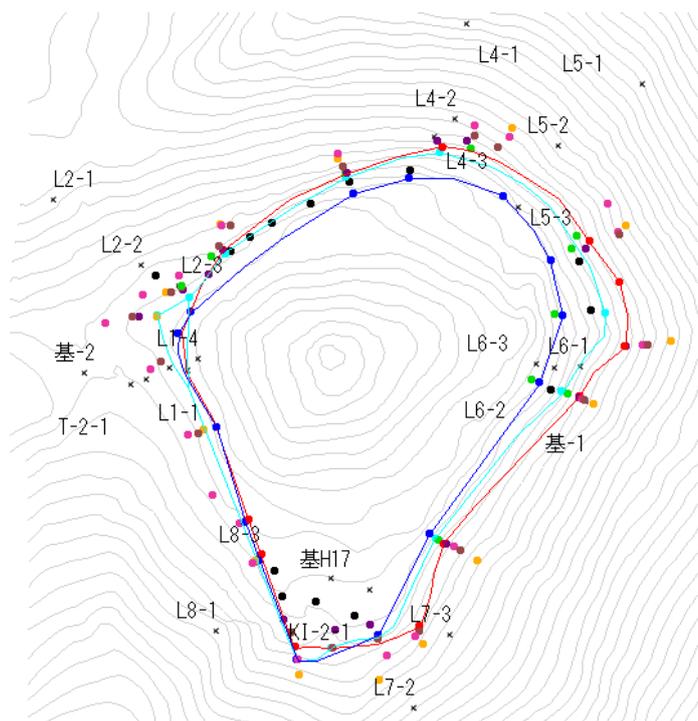


図 5-6 GIS 上での雪渓域の抽出

GIS 上の地図に雪渓端の位置を入力し、その点をもとに雪渓を再現する。図中の数字や×点は基準点を示す。



1976年10月17日 千蛇ヶ池

写真 5-1 福井大学雪氷班の写真の一例

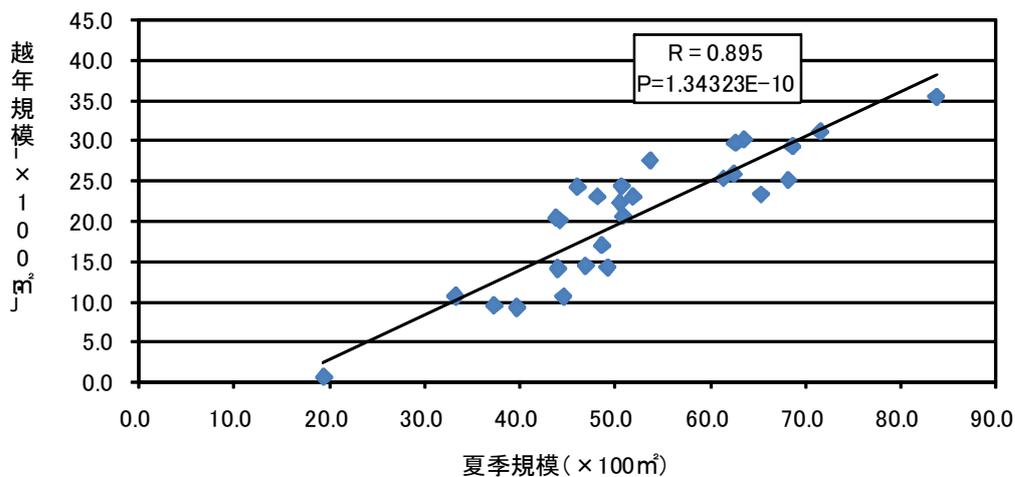


図 5-7 千蛇ヶ池雪溪の夏季規模と越冬規模との関係

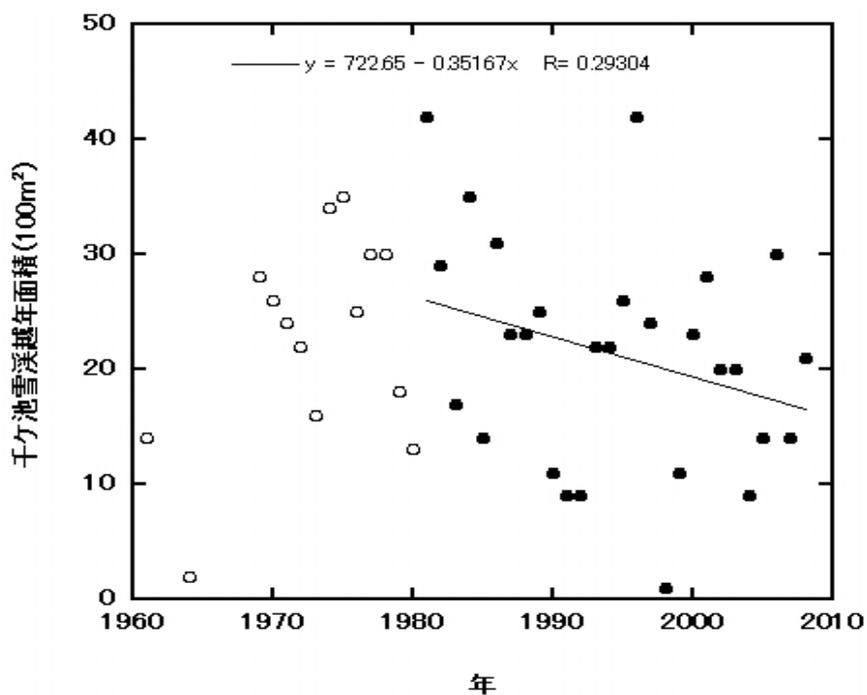


図 5-8 千蛇ヶ池雪溪の経年変化

図中の黒丸は現地調査による越冬面積を示し、白丸は過去の空中写真、福井大学雪氷班の写真などから推定した越冬面積を示す。また、実線は現地調査から得られた越冬面積についての回帰直線を示す。

5-8 最後に、今回の 2004 年から 2008 年までの白山の高山帯における温暖化の指標として、高山植物ではクロユリの開花時期を、また、越冬性雪溪である千蛇ヶ池雪溪の越冬規模を対象にそ

の面積の経年変化について調査を行った。その結果、クロユリの開花については、温暖化の影響によってこれまでより開花時期が早まった可能性が、また、千蛇ヶ池雪溪の越年規模については面積が縮小してきたことが明らかとなった。

地球温暖化は、急激に進行することが問題の一つとされている。しかし、クロユリも含めて白山の動植物が、そのような変化に対して、どのように反応するかは、今のところよく分かっていない。現在、温暖化の影響だとはっきりとはしていない事象を含め、今後も白山の動植物、特に高山帯の動植物の動態について継続的に調査していくことが必要である。また、越年生雪溪である千蛇ヶ池雪溪の調査は、これまで40年近くのデータが蓄積されているが、雪溪と周辺気象観測データとの関係もまだ不十分なことも多く、夏季の雪溪規模も考慮しつつ、気象要素との関連性について調査を進めていくことが必要である。

謝 辞

クロユリの開花調査に協力していただいた石川県自然解説員研究会の方々ならびに白山市地域振興公社職員の方々、千蛇ヶ池雪溪の越年規模の調査に協力していただいた福井大学の伊藤文雄氏（雪氷学）、現地調査や資料整理には佐川貴久氏に協力していただいた。ここに記してお礼申し上げます。

6. 定点観測地 アポイ岳（北海道）におけるヒダカソウの開花時期の変化

（担当 北海道環境科学研究センター）

6-(1) はじめに

アポイ岳は、低標高でありながら高山植生が成立しており、北海道内の他の高山地域と比較して、温暖化の影響を受けやすいことが、気象データによる高山植生の分布の将来予測において指摘されている（名取 他 2002）²²⁾。また、一般に高山植物の開花時期は、雪解け時期の影響を受けることが知られているが（Kudo 1992²³⁾ など）、ヒダカソウの開花時期は、生育地が風衝地であるため冬期の積雪が少なく、むしろ地表面温度の影響を大きく受けると考えられる。そこで、ヒダカソウの最大の生育地において気象観測を行い、生育地の気象条件を明らかにするとともに、各生育地において測定した開花開始日と日平均地表面温度との関係を基に、積算温量による過去の開花時期の推定を行った。



写真1 幌満お花畑からみたアポイ岳頂上



写真 6-2 ヒダカソウ開花個体.

6-(2) 調査地

調査は、北海道南西部に位置する標高 810.6m のアポイ岳の高山風衝草原で行った（42° 06′ N、143° 02′ E；写真1）。アポイ岳は、夏期に発生する霧による低温と短い日照時間、また冬期の少ない積雪といった厳しい気象条件により、標高 500m 以上の斜面上部から尾根筋にかけて高山植物群落が成立している（高橋 1985）²⁴⁾。アポイ岳から北西約 20km に位置する浦河町の 2008 年の気象データによると、年平均気温は 8.3℃（最低：-11.8℃、最高：25.2℃）、年降水量は 967mm、最深積雪は 12cm、霧の発生日数は 52 日であった（気象庁ホームページ a 2008）²⁵⁾

6-(3)材料 ヒダカソウ (*Callianthemum miyabeianum* Tatew.) は、キンポウゲ科キタダケソウ属の多年生草本である（写真 6-2）。生育地は、アポイ岳を中心とするアポイ山塊に限られ、斜面上部から尾根筋の、植被率が低く、れきの多い風衝草原や、岩壁基部の岩屑堆積地に分布している。4月下旬から6月上旬に株あたり 1～数個の白い花を咲かせ、開花後に根出葉を展開する（清水 1982）²⁶⁾。越冬芽を地表面近くの地中に持つため、春の生育開始時期は、地表面温度の影響を大きく受けると考えられる。

6-(4)調査方法

(1) 気象データと開花開始日のモニタリング

調査を行った生育地の概要を表 6-1 に示す。2004 年 10 月に最大規模の生育地である通称「幌満お花畑（生育地 B）」に設置した気象観測装置により、12 月～翌年 5 月の期間を 1 シーズンとした 4 シーズンについて、気温・積雪深・風速を 2 時間毎に測定した。また、ヒダカソウの主要な生育地 4 ヶ所（A、B、C、D）において、小型防水温度計（-20～+50℃ ストアウェイ ティドビット）を 3～6 個設置し、地表面温度を 1 時間毎に 4 シーズンについて測定した。その内開花個体がみられる 3 カ所（B、C、D）については、開花開始日の調査を 2004 年～2008 年に行った。開花前から生育地の踏査を 3～5 日毎に行い、各生育地で最初に開花が確認された日を開花開始日とした。

表 6-1 生育地の概要

生育地	標高 (m)	平均開花個体数 (2004～2008 年)
A	530	0
B	580-610	7.4
C	710-740	11.6
D	750-780	10.2

(2) 積算温量による過去の開花開始日の推定

生育地の日平均地表面温度と開花開始日との関係を明らかにし、過去のヒダカソウの開花日を推定するため、次の温量積算式を用いた。

$$K = \sum_{d_0}^n (T_{av} - T_{thr}) \quad T_{av} > T_{thr} \text{ の場合のみ積算} \quad (1)$$

T_{av} : 日平均地表面温度 T_{thr} : 生育限界温度 d_0 : 積算開始日

n : 積算開始日～開花日前日までの日数

ここで、西川・住田 (2007) ²⁷⁾により、 T_{thr} は 0、1、2、3、4、5℃の 6 パターン、 d_0 は 2 月 1 日、3 月 1 日、4 月 1 日の 3 パターンを仮定したとき、開花開始日の推定誤差と生育地間の開花に要する積算温量の変異の大きさが最小になるのは、 $T_{thr}=0^\circ\text{C}$ 及び $d_0=4$ 月 1 日の組み合わせであることが明らかになっている。これらの値を用いて、現地調査で得られた 3 生育地の各調査年の日平均地表面温度と開花開始日の 10 データセットについて、開花までの積算温量を積算式(1)により算出し、その平均値をヒダカソウの開花に要する「有効積算温量」とした。

また、2006 年～2008 年の 3 月 1 日～5 月 31 日の期間について、浦河町の日平均気温に対するアポイ岳の 3 生育地の日平均地表面温度の平均値についての回帰式を求め、この式を用いて 1927 年～2008 年におけるヒダカソウ生育地の日平均地表面温度を推定した(浦河町の気温データは気象庁札幌管区气象台より入手)。

推定した日平均地表面温度を用いて積算式(1)により求めた積算値が、開花に要する有効積算温量に達した日の翌日を開花開始日として、過去の開花開始日を推定した。

6-(5) 結果及び考察

(1) 観察されたヒダカソウの開花時期

各生育地における開花開始日の経年変化を表 6-2 に示す。開花日は生育地間で異なり、同じ生育地においても、年によって変動した。生育地間の開花順序は、4 年間同様の傾向を示し、B が最も早く、C が最も遅かった。最も早く開花した年はすべての生育地で 2008 年であったが、最も遅かった年は、生育地 B では 2005 年及び 2006 年、C 及び D では 2007 年であった。最も早い年と最も遅い年の開花日の差は 13 日～16 日であった。

表 6-2 調査地 B, C, D におけるヒダカソウ開花開始日の経年変化

生育地	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
B	5/1	5/11	5/11	5/4	4/25
C	5/13	5/19	5/18	5/20	5/5
D	5/8	5/13	5/13	5/15	5/2

(2) 幌満お花畑における気象観測結果

幌満お花畑（生育地 B）に設置した気象観測装置によって日平均気温及び日最大積雪深を測定した。ただし、風速は全期間を通して、積雪深は、2006-2007 年及び 2007-2008 年の 2 シーズンは、強風等により機器が破損したため測定できなかった。

いずれの年も、冬期間の日平均気温はほぼ連日氷点下を示しており、温度上昇がみられ、0℃を超えるようになるのは、3 月に入ってからであった。

2004-2005 年については、測定可能な積雪がみられたのは 1 月下旬～2 月上旬の期間のみで、積雪深も 22cm が最高と非常に少なかった。2005-2006 年は積雪が観測された日が多かったが、12 月下旬に 40cm の積雪を記録した以降、積雪深は 10cm 程度であった。風衝地である幌満お花畑のわずかな積雪は、植物のフェノロジーを大きく左右する要因にはならないと考えられる。

(3) 各生育地における地表面温度の変化

最も標高が低い生育地 A では、12 月中旬～4 月上旬の期間は、日平均地表面温度が 0℃前後で安定した値を示す日が多く、十分な積雪があったと考えられる。しかし、2006-2007 年及び 2007-2008 年の各シーズンは、生育地 A においても若干の温度の変動がみられ、積雪が少なかった。生育地 B、C、D の地表面温度はいずれの年もほぼ同様の变化傾向を示した。冬期間も温度の変動がみられることから、保温効果があるほどの積雪はなかったと考えられる。最も開花が早い生育地 B の温度は、他の生育地に比べわずかに高く推移し、最も開花が遅い生育地 C は、わずかに低く推移した。生育地間の開花開始日の変異は、温度環境を反映していることが示された。

図 6-1 に開花個体がみられない生育地 A を除く、3 生育地の日平均地表面温度の平均値の推移を示す。生育地 B の日平均気温の変化傾向と同様、地表面温度についても温度上昇がみられ、0℃を超えるようになるのは 3 月であった。

4) 開花日の推定誤差

積算式(1)によって算出した、開花個体のみられる 3 生育地における 2005～2008 年の開花まで

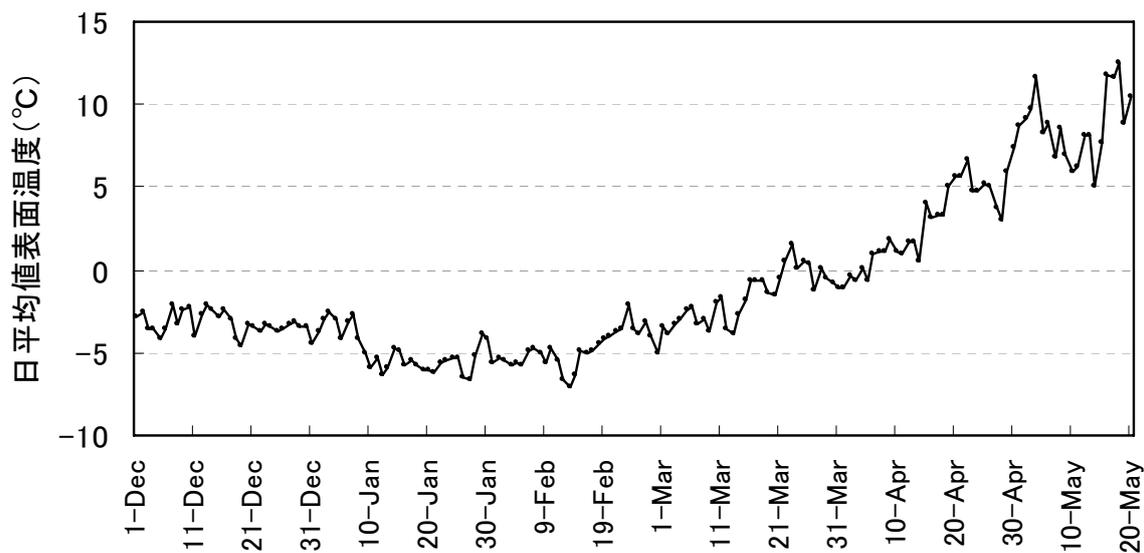


図 6-1 ヒダカソウ生育地の日平均地表面温度の変化. 3 生育地 (B、C、D) の 2004 年 12 月 1 日からの 4 シーズンの平均値を示した.

表 6-3 最適積算温量モデルに基づく、ヒダカソウの推定開花開始日と実際の開花開始日との差

調査年	生育地	開花に要する積算温量(°C)	推定開花日と実際の開花日との差(日)
2005	B	179.9	-4
	B	162.2	0
2006	C	153.5	1
	D	132.9	4
2007	B	105.8	6
	C	171.7	-1
	D	137.0	2
2008	B	186.6	-2
	C	192.2	-2
	D	176.5	-1
Mean ± SE		159.8 ± 8.7	2.3 ± 0.6

の平均積算温量は、 $159.8 \pm 8.7^\circ\text{C}$ であった (表 6-3)。この値を「開花に要する有効積算温量」として算出した各生育地の推定開花日と実際の開花日との差は、最大 6 日 (2007 年生育地 B)、平均 2.3 ± 0.6 日であった (表 6-3)。しかし、生育地間の推定された開花順序は、いずれの年も実際

の開花順序と同じであった。ヒダカソウの開花時期を決定する主な要因は、温度条件であると考えられるが、Price and Waser (1998) ²⁸⁾ が述べているように、降水量など他の環境要因によっても影響を受けると考えられる。

(5) 過去の開花日の推定

浦河町の日平均気温 ($x^{\circ}\text{C}$) と ヒダカソウ生育地の日平均地表面温度 ($y^{\circ}\text{C}$) との関係には、高い正の相関が認められたので ($r^2 = 0.764$, $p < 0.01$)、次の回帰式(2)によって過去のヒダカソウ生育地の日平均地表面温度を推定した。

$$y = 1.23x - 3.10 \quad (2)$$

生育限界温度を 0°C 、積算開始日を 4 月 1 日、開花に要する有効積算温量を 159.8°C とした積算式によって推定した、1927~2008 年のヒダカソウの開花開始日を図 6-2 に示す。年と開花開始日との間には、有意な負の相関が認められた ($r^2 = 0.089$, $p < 0.01$)。この関係から求めた 4 月 1 日から開花開始日までの日数 (y 日) の年 (x 年) に対する回帰式は、次のとおりである。

$$y = -0.070x - 180.86 \quad (3)$$

この回帰式(3)から、現在のヒダカソウの開花開始日は 100 年前と比較して約 7 日早まったことが推定された。浦河町の日平均気温は、過去 100 年間で約 0.9°C 上昇しており ($y = 0.0086x - 9.18$, $r^2 = 0.15$, $p < 0.01$)、このような気温の上昇に応じて、ヒダカソウの開花開始日が早まったことが推定された。アポイ岳周辺の海域を含む「釧路沖の海域」では、海水面温度の上昇傾向が 1 月から 6 月にかけて認められており ($p < 0.05$; 気象庁ホームページ b 2008) ²⁹⁾、また、浦河町では、年間降雪量が 100 年間で約 70cm 減少したことが推定される ($y = -0.69x + 1467.62$, $r^2 = 0.099$, $p < 0.01$; 気象庁ホームページ c 2008) ³⁰⁾。これらの現象は、アポイ岳周辺において温暖化が進行していることを裏付けている。

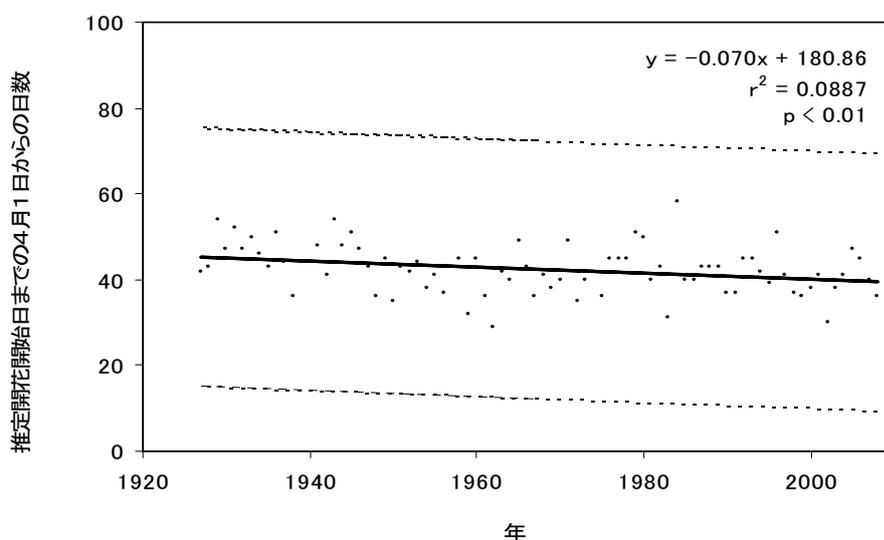


図 6-2 最適積算温量モデルに基づく、1927~2008 年のヒダカソウの推定開花開始日。波線は、回帰式 ($y = -0.070x + 180.86$) による推測値の 95% 信頼区間を表す。
西川・住田(投稿中)を一部修正。

謝辞

現地調査にあたり、様似町教育委員会及び日高支庁環境生活課自然環境係の方々に様々な便宜を図って頂いた。現地調査は、元アポイ岳ビジターセンターの住田真樹子氏とアポイ岳ファンクラブのみなさんに多大なるご協力を頂いた。また、気象観測装置の設置及びデータの回収は、(株)さっぽろ自然調査館及び様似山岳会のみなさんにご協力頂いた。記して感謝の意を表する。

6. 定点観測地以外での高山植生の長期変化

はじめに 近年、我が国高山帯においては、高山草原の減少、高山草原の植生変化など様々な変化が認められ始めており、温暖化の影響では？との疑念が持たれているものの、地球温暖化の視点から長期変化の傾向を捉え、その現象と気温上昇との関連にまで議論した例は数が少ない。そこで、地球温暖化の視点から定点観測地以外での高山帯での変化を把握することを目的に、我が国高山の南限域である南アルプスにおいて、植生調査などを行い、過去の調査結果と比較した。また、高山帯付近で長期の生物季節が長期にわたる観察結果が報告されている一連の尾瀬の自然保護を収集し、そのなかに記されている生物季節について検討した。

6-(1) 南アルプスの高山植生の長期変化

(担当 静岡大学理学部)

6-(1) -①方法 約25年前に植生調査を行った塩見岳から荒川三山（前岳、中岳、悪沢岳）にかけての高茎草原（いわゆるお花畑）内に、2m×2mの方形区を設置し、通常用いられている Brayn Blanquet の方法に従い植生表を作成した。そして、その結果と前回の結果と比較した。調査を行った地域を図6-1に示す。また、近田（1981）³¹⁾が報告したハイマツ生育場所のなかから、ハイマツ南限域の南アルプス光岳（2,591m）周辺およびそれ以南のイザルガ岳（2,540m）～池口岳（2,392m）にかけての計6ヶ所で、報告されていたハイマツの生育場所を探索し、ハイマツの確認及び植生及び群落調査を行った。その範囲を図6-2に示す。

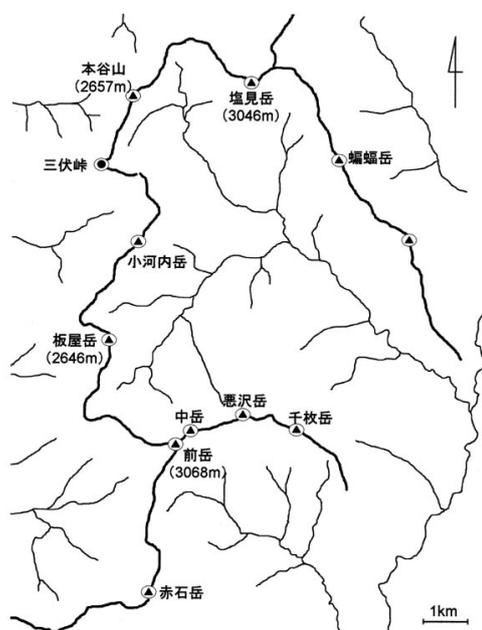


図6-1 約25年前の植生調査結果との比較のために調査行った範囲

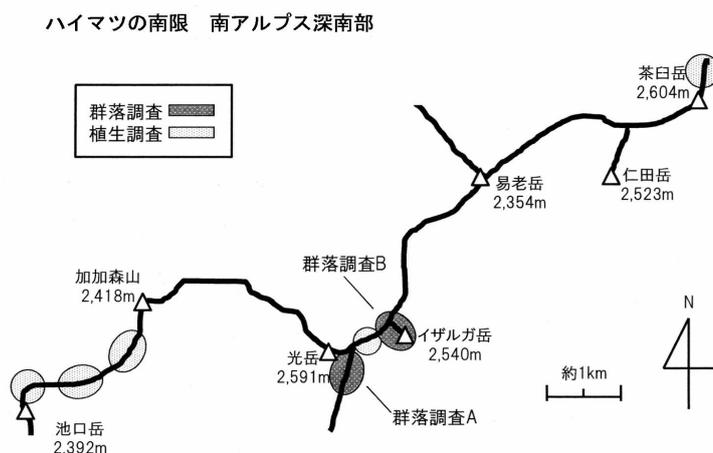


図 6-2 ハイマツ南限域でのハイマツ生育確認調査の場所

6-(1) ②結果および考察

1) 約 30 年間における高茎草原の変化

本プロジェクトで行った植生調査結果と約 30 年前の調査の結果を比較し、場所毎に以下に要約する。

<塩見岳> 南アルプスの塩見岳 (3046m) は北岳、間ノ岳、農鳥岳の白峰山塊から南南西に延びる赤石山塊に位置している。塩見岳から荒川前岳・赤石岳 (3120m) までは権右衛門山・本谷山・鳥帽子岳・小河内岳・板屋岳の峰々が連なり、この稜線沿いには針葉樹に混じって草本群落が見られる。稜線の西側斜面は大きく浸食され、常に崩壊が生じている急斜面である。また、塩見岳の東側の雪渓跡地の植物群落は、ニホンジカの影響を受けた群落の中でも、比較的自然度の高い群落で現在タカネヨモギが優占する群落となっている。この付近は、30 年前の調査では、草丈の高いシナノキンバイやハクサンイチゲの草本群落が広く分布していた (写真 6-1)。しかし、2005 年にはシナノキンバイが優占している群落の面積は急激に縮小していた。以前にはシナノキンバイとハクサンイチゲの被度は、ほぼ 100%から 75%であったが、2005 年にはタカネヨモギが優占種で 75%、シナノキンバイは 10%と変化した。この大きな変化はニホンジカの食圧、踏圧によるもので、ニホンジカが急速に増加した影響は、高山の「多年生草本群落」にまで達していることが明確となった。

塩見岳の植物群落の中でも、ニホンジカによる攪乱が大きい場所は彼らが嫌って食べないタカネヨモギまたはバイケイソウが優占している。これに混生するように、ホソバトリカブトが生育している。これらの下部にはキバナノコマノツメが分布したり、地表面が露出している。また、場所によっては植生がなく、裸地化していて、すでにエロージョン (土壌侵食) が起こっている (写真 6-2)。全体として、ニホンジカの強度の食圧・踏圧によって植生がきわめて単純化している

<三伏峠>

三伏峠は、赤石山脈のほぼ中央に位置しており、静岡県側と長野県側を結ぶ最高所の峠であるとされている。ここは大井川水系の西俣沢の源頭にあたり、峠の東側では草本群落が峠

から下に向って三角状に広がっている。その下方にはダケカンバ・シラビソ林が発達している。三伏峠の草本群落は、森林限界より下の亜高山帯に位置し、稜線の鞍部の風背側の緩斜面であることから、このお花畑の成立は、風と雪の影響が大きいとされている。

針葉樹林に囲まれたこの草本群落も、ニホンジカによる攪乱が大きく、典型的な草本群落は、森林のへりにわずかに存在しているだけである。ニホンジカの影響が大きい場所はホソバトリカブトが優占し、バイケイソウとわずかであるがシシウドが混生している。草本層はまばらで、種類数もきわめて少なく貧弱である。かつては草丈の高いシシウドが優占し、高い密度でシナノキンバイ・ハクサンフウロ・オオカサモチが混生するお花畑であった（写真 6-3）。2005 年には、シシウドはわずかとなり、それらの下部にシロバナノヘビイチゴとスゲの仲間が高い割り合いを占め、ほとんど芝生状の景観となってしまった（写真 6-4）。

三伏峠の植物群落の中でもニホンジカの影響が比較的少ない地点が、林縁に沿って成立している。この細長い群落は芝生状の植生ではなく、草丈の高い草本植物が存在し、ニホンジカによる食圧を受ける以前の状態がわずかに残っている。優占種はマルバタケブキで、それにバイケイソウ・ホソバトリカブト・シシウドが混生している。ほんのわずかシナノキンバイも見られる。1980 年代前半にはミヤマキンポウゲとシナノキンバイが多くを占めていたが、近年はマルバタケブキが優占し、前述の二者はさらに小型化して、ごくわずかに存在している。また、東側の面には、ニホンジカの踏圧によって生じたものと思われるキャトルテラスと、地表面が盛り上がったアースハンモックが見られ、30 年前とはまったく異なってしまった。

このような状況から、ニホンジカ個体群がこれ以上増大すれば、本来のお花畑は変わってしまい、標高の低い場所から移入する植物が増え、木本植物の侵入なども懸念される。高山帯におけるニホンジカの個体数増加に関しては、冬期の積雪量が大きく関係していると言われており、温暖化による積雪量の減少によって、ニホンジカの厳冬期の死亡率は低くなり、春期の移動距離も増大する。

<北岳・荒川三山（前岳、中岳、悪沢岳）・荒川のお花畑>

北岳・荒川三山・荒川のお花畑は現在南アルプスの中では最も多様性の高い高山植物群落が分布するところである。北岳には石灰岩地があって、そこには周北極要素の植物を含む希少な高山植物が多く見られる。キタダケソウの群落はその代表的なものである。荒川三山の南側にはカール地形が存在し、このカール地形の各構成部分に、それぞれに適応した植物群落が分布している。ここでは多様な地形に、多様な植物群落が見られ、まるで高山植物の標本庫のようであり、現在でも、その花の密度は高く、見事なお花畑を見ることができる。幸いなことに、これら 3 ヶ所のお花畑は現在ニホンジカの影響は少ないようであるが、これらの場所のすぐ近くまでニホンジカが来ている。

2) ハイマツ南限地域でのハイマツの生育の確認調査

光岳から南西にのびる稜線にはかつてハイマツ群落が存在したという報告があった（近田 1981）¹²⁾。その報告をもとに、ハイマツの確認調査を行った（図 8）。しかし、文献に記されていた加加森山～池口岳までの間で、ハイマツが分布する可能性のあるような立地はそのほとんどが

ゴヨウマツにより占められおり、ハイマツは認められなかった。池口岳山頂の北西にある小規模の岩りょう帯にはハイマツではなくゴヨウマツが優占的に分布していた。各調査地点では近年急速にゴヨウマツの分布が拡大し、稜線の西側のガレ場には幼樹が数多く見られた。また、稜線沿いはシラビソの成長が急速であり、年枝の成長量から過去5年ほど以前と以後とでは大きさに違いがあった。ゴヨウマツの分布拡大、シラビソの急速な成長は遺存種として残存していたハイマツを駆逐してしまった可能性がある。また、聞き取り調査の結果、以前ハイマツが認められた丸盆岳でも、ハイマツが消滅したとの情報が得られた。したがって、現時点でのハイマツ群落の南限は光岳から百俣沢の頭を結ぶ稜線上に存在する群落と言える。これらの結果から、以前生育していたハイマツが消滅し、近年、分布南限が北上してきていると結論した。



写真 6-1 塩見岳東側の雪溪跡地斜面。
シナノキンバイが優占する草本植物群落（1979年）。



写真 6-2 塩見岳東側の雪溪跡地斜面。
タカネヨモギまたはバイケイソウが優占する植物群落（2005年）。



写真 6-3 : シシウド、シナノキンバイ、ハクサンフウロ、オオカサモチが生育する三伏のお花畑（1979年）。



写真 6-4 : マルバダケブキ、バイケイソウ、ホソバトリカブトが生育しているが、多くは芝生状の植生（2005年）。

6-(2) 尾瀬（群馬県）でのミスバショウとチシマザクラの開花の経年変化

6-(2)-①はじめに 収集した一連の「尾瀬の自然保護」¹³⁾は、温暖化影響を把握するためではないものの、尾瀬（群馬県）山の鼻周辺では、一部欠損値があるものの、1979年から物7種の開花日（ミスバショウ、チシマザクラ、カキツバタ、サワギキョウ、ニッコウキスゲ、ヒツジグサ、オゼコホネ）と動物4種（モリアオガエルの産卵、カッコウ、ホトトギス、ウグイスの初鳴き）の観察が続けられており、同時に、気温、積雪深などの気象要因も測定されており、温暖化影響を把握するために大変貴重な観察資料である。そこで、収集した一連の「尾瀬の自然保護」¹³⁾に報告されている植物の開花日の経年変化を整理した。また、近年のデータは、尾瀬保護財団から提供して頂いた。

6-(2)-②結果及び考察 まず、山の鼻での気象要因の変化について、図3-5に示したように、4月と5月の月平均気温は近年上昇してきている。一方、図3-6に示したように4月と5月各1日の積雪深には、顕著な長期傾向は認められない。次に、観察が続けられている植物7種のなかから、一例として春先早く開花するミスバショウとチシマザクラの開花日の経年変化を図6-3に示した（1985年のデータは、異常値として除いた）。

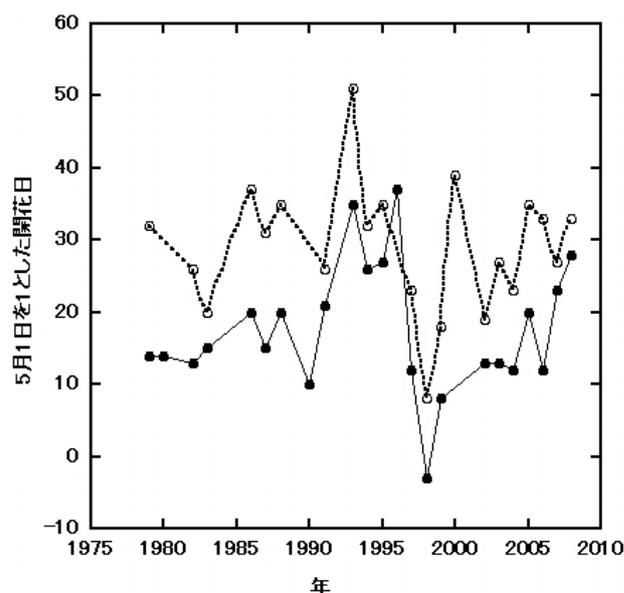


図6-3 尾瀬（群馬県）山の鼻付近でのミスバショウとチシマザクラの開花日の経年変化

図中の黒丸はミスバショウの開花日を示し、白丸はチシマザクラの開花日を示す

ミスバショウ、チシマザクラとも近年特に、開花が早まっている傾向は認められなかった。また、ミスバショウとチシマザクラの開花日に及ぼす気象要因との関係を調べるため、図3-5に、ミスバショウとチシマザクラの開花日と開花日に近い5月1日の積雪深との関係を示した。

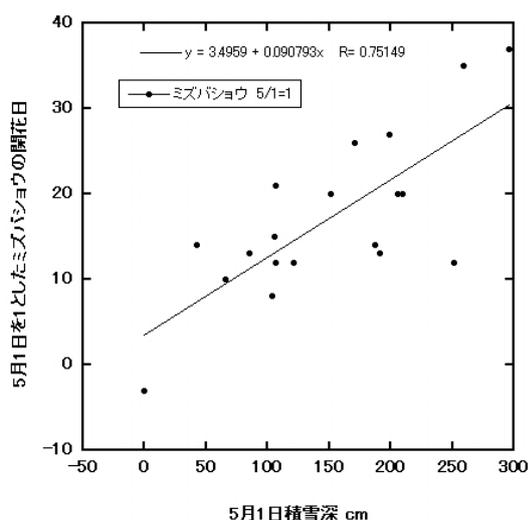


図 6-4a ミズバショウの開花日と 5 月 1 日の積雪深との関係

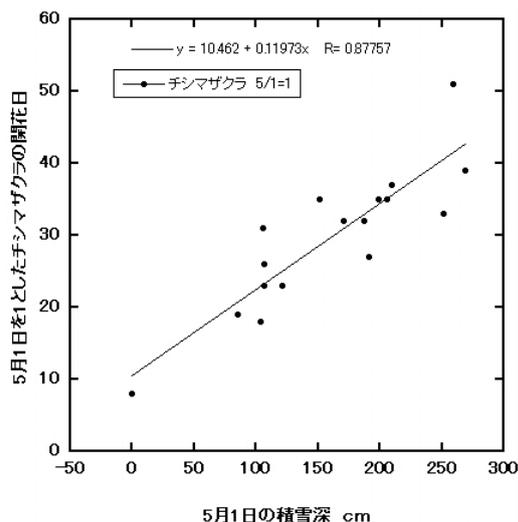


図 6-4b チシマザクラの開花日と 5 月 1 日の積雪深との関係

この結果、両種とも開花日は 5 月 1 日の積雪深との関係が深いことが分かった。高山植物の開花は、消雪日とその後の気温とに影響される（工藤、2000）³²⁾。本解析では、消雪日の代わりに、データ数が最も多く、また、消雪日近い 5 月 1 日の積雪深を用いた。図 3-6 に示したように、山の鼻での 5 月 1 日の積雪深の経年変化には、顕著な傾向が認められていない。そのため、5 月 1 日の積雪深（消雪日の代わりに用いた）と関係が深い両種の開花日の経年変化に顕著な傾向が認められなかったと結論した。3.我が国高山帯での気温及び雪環境の長期変化の把握で述べたように、高山帯での積雪深と気温上昇との間には、多くの要因が関係しており、現時点では、山の鼻で観察されている気温上昇が直ちに、開花日に大きな影響を与える消雪日の早まりとはなっていないと思われる。しかし、将来、気温が今以上に上昇した場合、尾瀬においても、気温の上昇が消雪日の早まりとなる頻度が増加し、ミズバショウ、チシマザクラの開花日が早くなることは十分考えられる。実際、4 月、5 月の気温が高かった 1998 年と 2004 年のうち、1998 年は 5 月 1 日の積雪深が極めて小さく（図 3-5 と図 3-6）、両種の開花日も早かった（図 6-3）。両種以外の 5 種については、ニッコウキスゲを除いて、開花日と 5 月 1 日の積雪深との関係が深かった。その結果、ニッコウキスゲを含め開花日の経年変化に顕著な傾向は認められなかった。

7 衛星リモートセンシングを活用した我が国高山帯での雪環境の把握

(担当 東京大学大学院)

7-(1)はじめに 高山生態系において、積雪期間や積雪深などの積雪の状況は、高山植物の開花時期の変化やシカ・イノシシなどの野生動物の生息域変化など、多くの生態系のプロセスに影響を及ぼすことが知られている。衛星リモートセンシングによる雪環境のモニタリングは、観測データが存在しない地点での情報の取得や広域における面的な情報取得に優れており、温暖化のモニタリングにおいても利用されている。例えば、1972年～2005年のNOAAの衛星データセットを使用して、北半球における春季(3～4月)の積雪域面積の減少が報告されている(IPCC-WGI, 2007)³³⁾。本研究では、衛星リモートセンシングデータを使用した雪環境のモニタリングを目的として、2002年～2003年の寒候期における日本全域のMODISデータ(日単位)とアメダスによる積雪深実測値を利用して、積雪域を推定する手法および各ピクセル(画素)における積雪域の比率(積雪比率)を推定する手法を検討した。また、それらの方法を、他の年次のMODIS画像データに適用することによって、雪環境のモニタリングを行った。

7-(2)-① MODIS データおよび積雪指標 NDSI

本研究では、衛星リモートセンシングデータであるMODISセンサによって取得されたデータ(MODISデータ)を利用した。MODISデータは日単位の画像データを利用できる。空間解像度は250m、500m、1000mの3種類であり、観測される波長帯(バンド)によって、空間解像度は異なる。本研究では、バンド1からバンド6までの反射率データを使用した。各バンドの波長域は次のとおりである。

バンド1 : 620-670nm、バンド2 : 841-876nm、バンド3 : 459-479nm、

バンド4 : 545-565nm、バンド5 : 1230-1250nm、バンド6 : 1628-1652nm

バンド1と2の空間解像度は250m、バンド3～6の空間解像度は500mであるが、500mに解像度を合わせて、解析に使用した。使用したデータは、2002年11月～2003年5月における日単位のデータである。これらのデータは、東京情報大学総合情報学部情報システム学科から提供されたものである。

積雪指標 NDSI (Normalized Difference Snow Index)

積雪指標 NDSI は、雪の分光反射特性が波長 600nm 付近で高く、波長 1500 nm 付近において低いことを利用して作られている(Dozier 1989)³⁴⁾。MODIS データでは、可視域(緑)のバンド4と短波長赤外域のバンド6が対応しており、これらのバンドの反射率を利用して、NDSIの算出が可能である(式 1)。

NDSI (Normalized Difference Snow Index)

$$NDSI = \frac{band4 - band6}{band4 + band6} \quad (\text{式 1})$$

NDSI は、正規化された指標であるため、算出される値の範囲は-1.0～1.0 であり、ピクセルが積雪域に占められている状態のとき、NDSI は大きい値を示す。既往の研究(例えば、Dozier 1989,³⁴⁾ Hall et al. 2002³⁵⁾) では、0.4 以上のとき、積雪域と判定している。

図 7-1 および図 7-2 に、2003 年 4 月 15 日における北海道の MODIS 画像（可視画像）および NDSI の分布図を例として示す。欠損域は雲の影響によるものである。

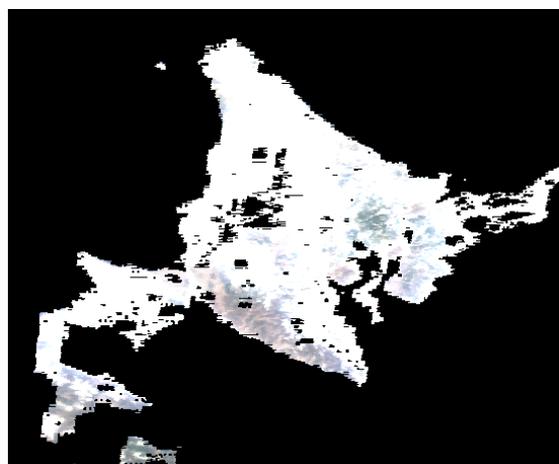


図 7-1 MODIS 画像の例（2003 年 4 月 15 日）（R: band1, G: band4, B: band3）

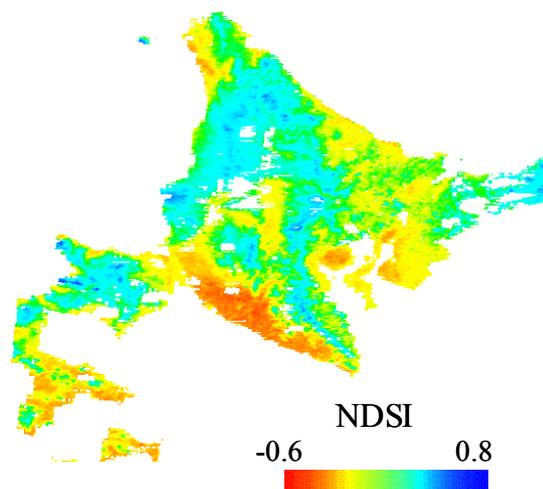


図 7-2 NDSI 分布図の例（2003 年 4 月 15 日）

7-(2)-② アメダス積雪深データ

積雪深データは「アメダス年報」CD-ROM データを利用した。積雪深の観測データは、特定観測所での有線ロボット積雪深計によるものであり、超音波式積雪深計により自動観測されている。このデータの観測所は北海道内に 106 箇所、青森から九州までの地域で 176 箇所あり、日別データを取得できる。このデータのうち、MODIS 画像データと同期間の 2002 年 11 月から 2003 年 5 月のデータを利用した。

7-(3). 積雪域と積雪比率の推定方法および推定結果

7-(3)-① 積雪域の推定

7-(3)-①-ア 積雪域の推定方法

NDSI によって、積雪域と無積雪域を判別するためには、NDSI が取り得る値の範囲（-1.0～1.0）において、適切な閾値を決定する必要がある。そこで、「アメダスの積雪深データにおいて積雪がある場合に、画像データからも積雪があると推定する比率 α 」と「アメダスの積雪深データにおいて積雪がない場合に、画像データからも積雪がないと推定する比率 β 」を算出し、その 2 つの比率が等しくなる場合の NDSI の閾値を採用した（表 7-1 および式 2、式 3）。この閾値を使用することによって、積雪がある場合とない場合の双方の推定において、同じ精度での推定が可能となり、雪環境のモニタリングに利用できる。

$$\alpha = \frac{A}{A+B} \quad (\text{式 2}); \quad \beta = \frac{D}{C+D} \quad (\text{式 3}); \quad \gamma = \frac{A+D}{A+B+C+D} \quad (\text{式 4})$$

表 7-1 NDSI の閾値の決定方法

		NDSI の閾値による推定	
		積雪： 有	積雪： 無
アメダス（実測）	積雪： 有	A	B
	積雪： 無	C	D

*表中の A~D はサンプル数を示す

なお、式 4 の γ の値は、積雪の有無を正しく判定する正答率を示す。

7- (3.) -①-イ 積雪域の推定結果

図 7-3 に、北海道において、NDSI の閾値に応じた積雪の有・無の正答率（精度）の変化を示す。双方の値が同じとなる NDSI の閾値は 0.25~0.26 であり、閾値を 0.25 と決定した。したがって、NDSI が 0.25 以上の場合、積雪域と判定することになる。このときの NDSI による積雪の有無の推定精度（正答率）は 97.2% となった。

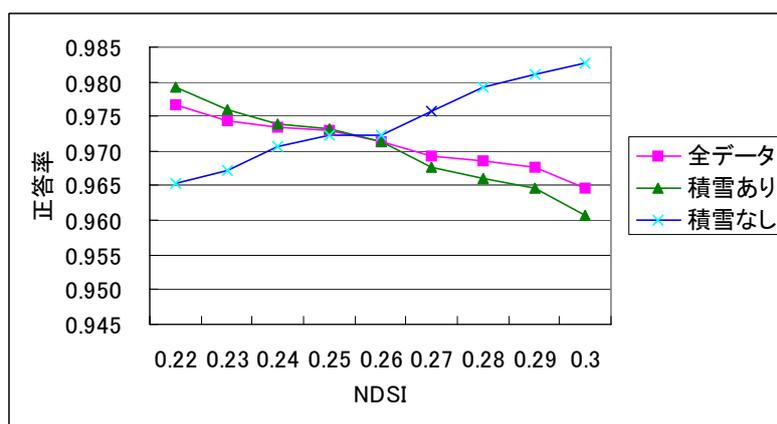


図 7-3 NDSI の閾値に応じた推定精度の変化

図 7-4 に、2002 年 11 月下旬、2 月下旬および 2003 年 5 月下旬の 3 時点における 10 日間のコンポジット画像を示す。積雪域の空間的变化を把握することができる。

また、森林域のみにおいて同様の分析を行った結果、NDSI の閾値は 0.25 となり、積雪の有無の正答率は 95.5% となった。なお、森林域の抽出は、夏季における MODIS データを使用して、教師無し分類法である ISODATA 法によって 6 カテゴリの土地被覆に分類し、6 カテゴリの中から、北海道の植生分布図を参考にしてカテゴリを選択した。土地被覆分類を行わない場合および森林域に限定した場合の双方において、NDSI の閾値は 0.25 となり、95% 程度の精度にて、積雪域の推定が可能であることが示された。

日本全域において、同様に NDSI の閾値の解析をしたところ、閾値 0.25 のとき、正答率は 93.0% となった。既存の研究にて使用されている閾値 0.40 の場合、正答率は 88.0% となるため、閾値を 0.25 に設定して積雪域を推定するほうが適しており、日本全域を対象とした場合でも、90% を超える精度にて、積雪域の推定が可能であることが示された。

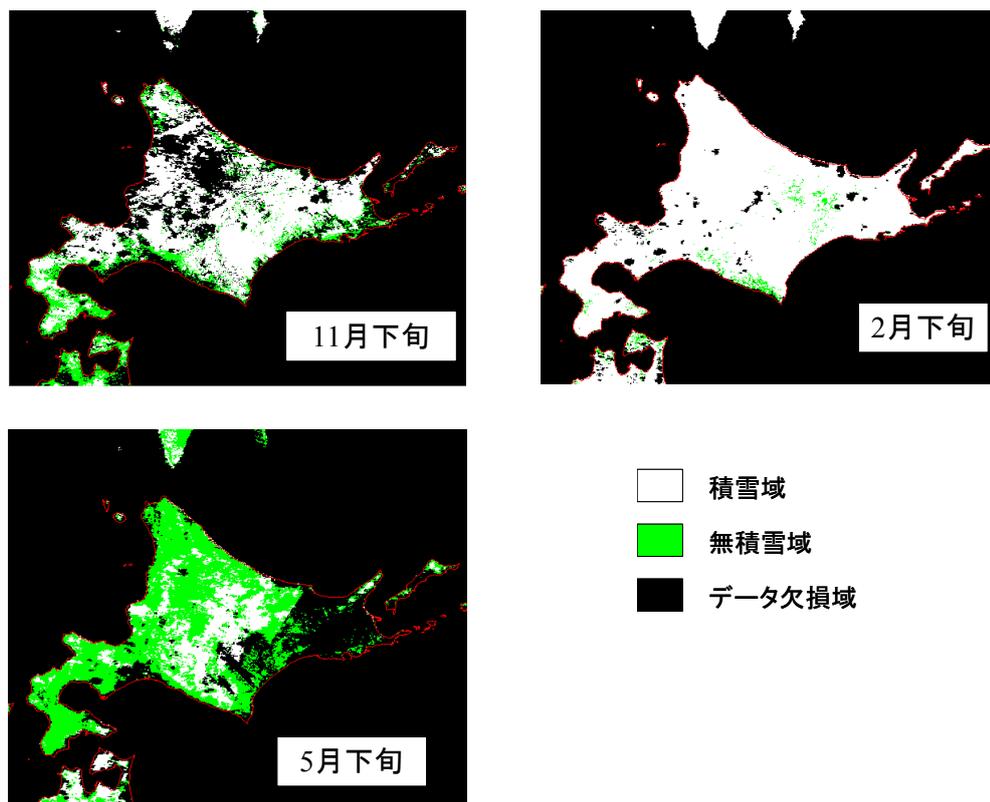


図 7-4 北海道における積雪域の推定図

日本全域において、同様に NDSI の閾値の解析をしたところ、閾値 0.25 のとき、正答率は 93.0% となった。既存の研究にて使用されている閾値 0.40 の場合、正答率は 88.0% となるため、閾値を 0.25 に設定して積雪域を推定するほうが適しており、日本全域を対象とした場合でも、90% を超える精度にて、積雪域の推定が可能であることが示された。

7- (3) -② 積雪比率の推定

使用した MODIS データの空間解像度は 500m であるため、積雪深が小さい場合、ひとつのピクセルが積雪域のみで占められることは少なく、積雪以外の土地被覆の影響を受けることになる。したがって、消雪時期のように積雪深が小さい場合、積雪域の推定に誤差が大きくなる傾向にある。そこで、ピクセル中に積雪域が占める比率（積雪比率）と NDSI との対応関係から、NDSI による積雪比率の推定を試みた。

7-(3)-②-ア 積雪比率の推定方法

積雪比率の推定には、2003 年 2 月 27 日時点の北海道南東部(十勝・釧路周辺)における MODIS データから作成した NDSI 画像を使用した。

画像において、雪と植生の 2 つの土地被覆により構成される地域を対象として、次の手順により、積雪比率を推定した。①積雪および植生のエンドメンバーを決定する。②積雪比率を 0.0～1.0(0%

～100%) の範囲において、0.01 (1%) ごとに変化させ、積雪比率に応じた NDSI の変化を求める。③NDSI 画像から、各ピクセルの積雪比率を推定する。また、他の手法による推定結果と比較するため、①のエンドメンバーを使用して、ミクセル分解による積雪比率の推定を行った。

推定結果の検証には、MODIS データと同日に観測された Landsat-7 ETM+画像データ (空間分解能 30m) を使用した。教師無し分類法によって、土地被覆分類をおこない、積雪域のピクセルを抽出した後、MODIS データの 1 ピクセルに占める積雪域ピクセルの比率を算出した。

7-(3)-②-イ 積雪比率の推定結果

雪および植生のエンドメンバーは一意に定めることはできないため、2003 年 2 月 27 日の MODIS 画像から取得したもの (EM-MODIS)、2002 年 8 月 (夏季) および 2003 年 2 月 (冬季) の MODIS 画像から取得したもの (EM-MODIS 2)、実験室内にて計測した分光反射率 (文献値) (EM-lab) の 3 種類のエンドメンバーを使用した。

3 種類のエンドメンバーを使用して、NDSI と積雪比率の対応関係を求めた (図 7-5)。

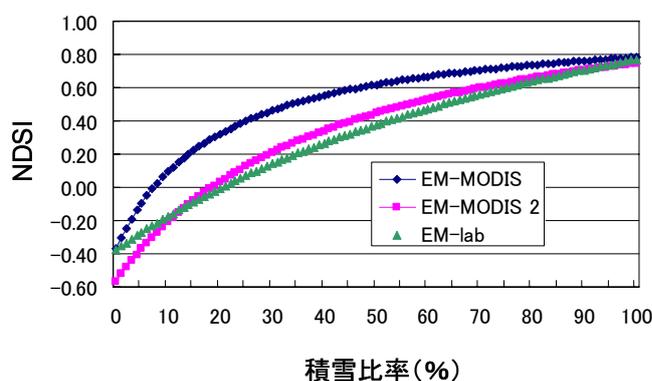


図 7-5 NDSI と積雪比率の対応関係

表 7-2 に、Landsat 画像から導出した積雪比率に対する誤差として、平均偏差の値を示す。EM-MODIS の場合を除き、NDSI による推定は、ミクセル分解による推定結果よりも、誤差が小さかった。またエンドメンバーによる違いでは、EM-MODIS の場合、冬季の画像のため、植生のエンドメンバーを取得することが難しく、大きな誤差が生じたと考えられる。NDSI による積雪比率の推定において、EM-MODIS 2 および EM-Lab の場合は、12～13%程度となり、同程度の誤差であった。この結果をもとに、NDSI 画像から積雪比率の推定図を作成した。

表 7-2 エンドメンバーの種類と積雪比率推定方法ごとの平均偏差

積雪比率の推定方法	エンドメンバーの種類		
	EM-MODIS	EM-MODIS 2	EM-Lab
NDSIによる推定	27.6%	13.0%	12.0%
ミクセル分解による推定	20.6%	19.7%	20.4%

図 7-6 に、エンドメンバー：EM-MODIS 2 を使用した場合の北海道南部（日高山脈・十勝平野）における積雪比率の推定図を示す。2003 年 4 月～5 月における 4 時点における積雪比率の推定図において、積雪比率の時系列・空間分布の変化を把握することができる。

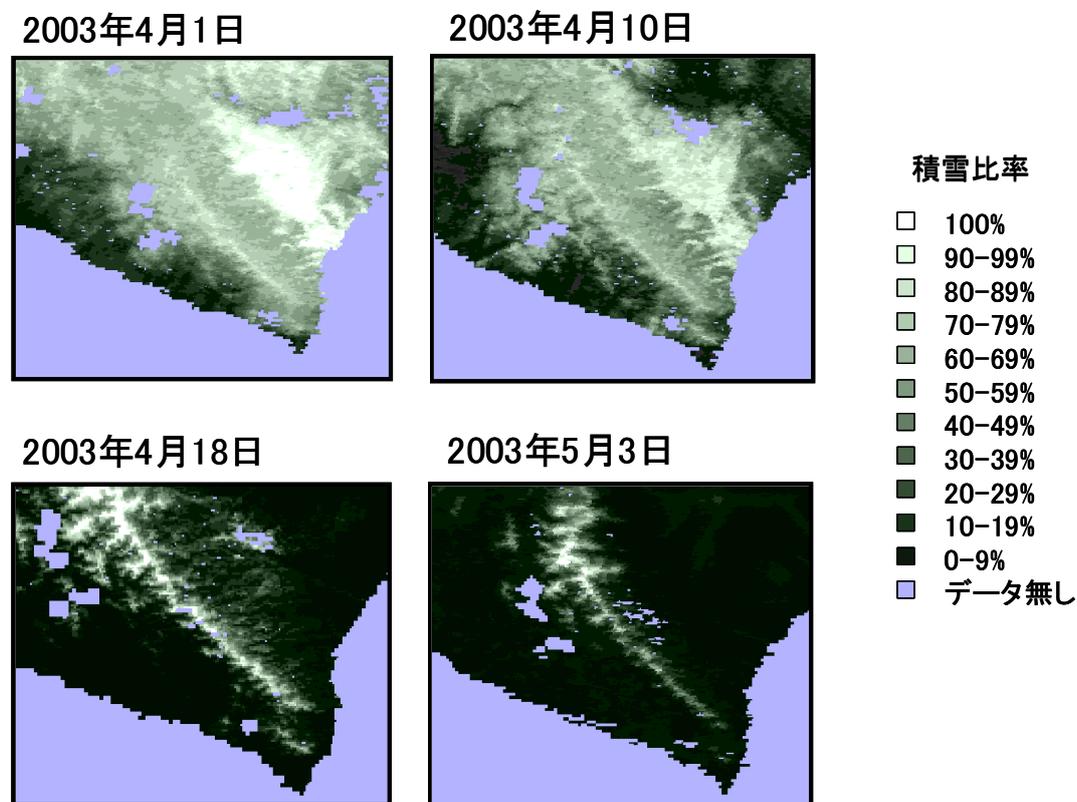


図 7-6 北海道南部（日高山脈・十勝平野）における積雪比率推定の例

7- (4). 2003 年～2008 年の雪環境のモニタリング

積雪比率の推定方法を使用して、北海道における雪環境のモニタリングを行った。図 7-7 に、2003 年～2008 年の各年の 3 月下旬における北海道中央部の積雪比率の分布図を示す。なお、図 7-7 において右図の枠部分が積雪比率を推定した範囲である。同じ時期（3 月 21 日～28 日）における積雪比率の分布図であるが、年次によって、積雪比率の分布が異なることがわかる。6 年間において、2008 年の積雪比率が最も小さく、2008 年 3 月の記録的高温の影響と考えられる。なお、これらの MODIS データは、NASA MODIS Land products のうち、8 日間コンポジットデータである「MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m」を使用した。

7- (5). おわりに

本研究では、衛星リモートセンシングである MODIS データを使用して、積雪域および積雪比率を推定する手法を検討し、その方法を使用して、雪環境のモニタリングを行った。数年分のみの MODIS データによるモニタリングの結果では、雪環境における温暖化影響の検出をおこなうこと

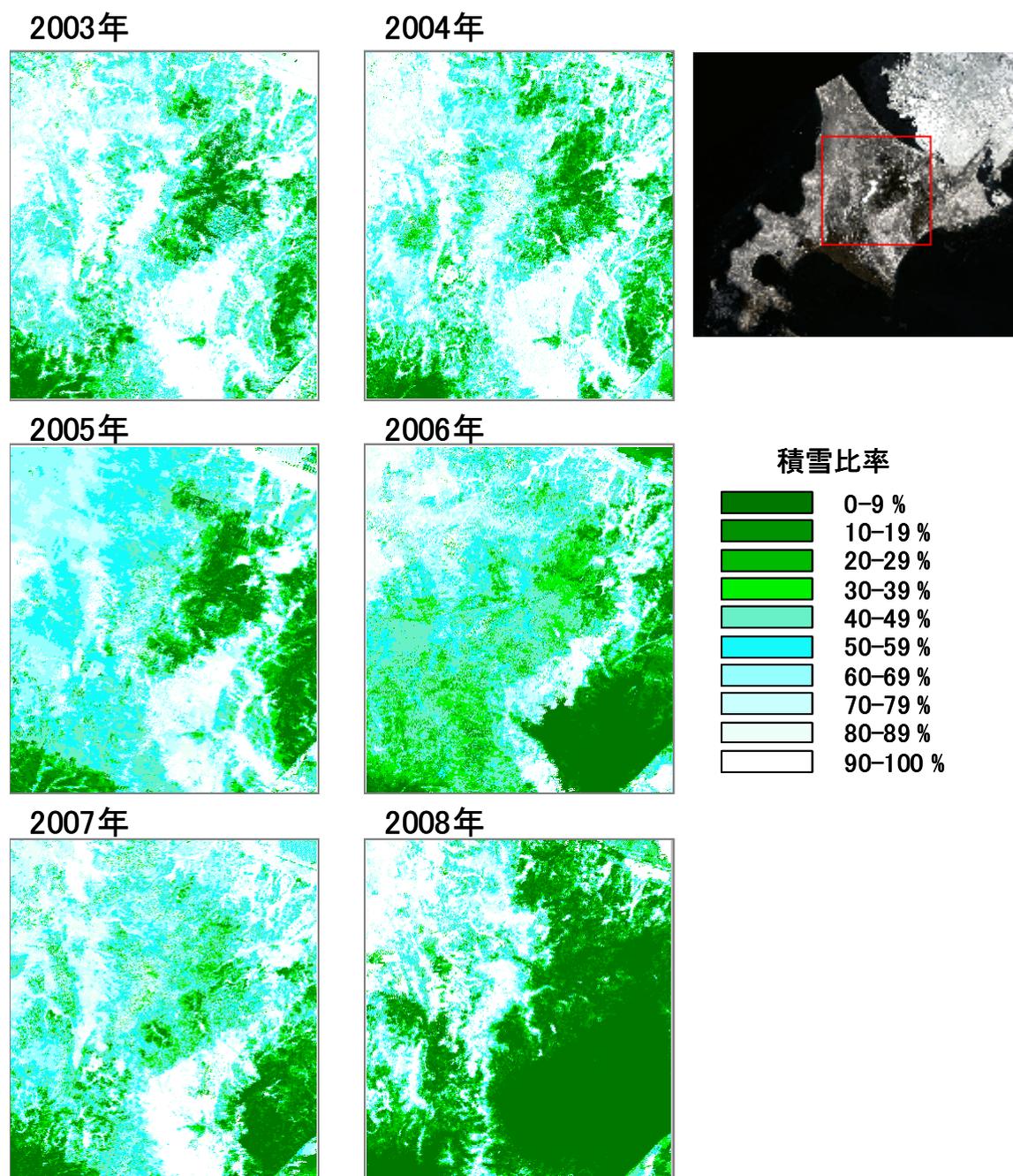


図 7-7 2003 年～2008 年 3 月下旬における北海道中央部の積雪比率の分布

は難しいが、継続的に雪環境のモニタリングを行うことによって、高山生態系において重要な環境要因と位置づけられる雪環境の変化を把握することが可能になると考えられる。

8 本研究により得られた成果

近年、我が国高山帯では様々な変化が観察されており、その原因の一つとして地球温暖化の影響では？との疑念がある。しかし、現時点で、ある変化の原因を地球温暖化の影響と結論づけるのは容易なことではない。また、我が国の高山帯では、これまで温暖化影響検出を目的とした系統だった温暖化影響モニタリング研究が十分に実施されてこなかったというのが実情である。そこで、本プロジェクトでは、IPCC 第3次評価報告書に示された影響検出手順を参考に高山植生を活用した温暖化の影響検出・把握についての重点的研究を行った。

まず、公表されている気象資料などをもとに、我が国高山帯での気温の長期変化の傾向を調べた。その結果、富士山頂での年平均気温は、人間活動に伴い排出された温室効果ガスの寄与が強く示唆されている世界の年平均地上気温の上昇とほぼ同様に、1980年以後上昇していることが分かった。また、我が国高山帯の分布範囲である中部地方から北海道までの地上3000mの年平均気温の長期変化については、測定場所による差は小さく、富士山頂での年平均気温のそれと良く似ていることも分かった。気温と同様に、高山帯での様々な現象に大きな影響を与える高山帯の雪環境の変化について、公表されている資料などを検討した結果、富士山頂では2000年ころから春先の積雪深が減少傾向であること、乗鞍岳（長野県と岐阜県）では近年無降雪期間が長くなる傾向であること、白山山麓では最大積雪深が減少傾向であることが分かった。しかし、尾瀬（群馬県）では、近年の春先の積雪深に顕著な傾向は認められず、場所により積雪深の長期変化の傾向が異なっていることが分かった。

これら我が国高山帯での気象要因の変化傾向を把握する一方、我が国高山帯の気象特性を考慮し、北岳（山梨県）、白山（石川県）、アポイ岳（北海道）に定点観測地を設定した。そして、気温上昇に対する反応時間が短くまた気温との関係が比較的明確な指標である開花時期（北岳ではキタダケソウ、白山ではクロユリ、アポイ岳ではヒダカソウ）を選び、定点観測地でモニタリング調査を行った。さらに、白山では、越年性雪渓である千蛇ヶ池の越年規模のモニタリング調査も行った。それらの調査結果をもとに、指標の長期変化を求めた。その結果、選出した3種の植物の開花時期の早まりが示唆された。また、千蛇ヶ池雪渓の越年規模が減少傾向であることが分かった。

定点観測地以外の場所である南アルプス中部において高山高茎草原の植生変化の調査やハイマツ南限域におけるハイマツの生育確認調査を行った。その結果、約30年に比べて高山高茎草原の種組成が大きく変化している場所が認められ、この主な原因として、近年、高山帯へ侵入してきているシカの食害と結論した。シカの個体数の増加や分布域の拡大には、近年の暖冬や積雪深の減少が一因となっていることが知られている。また、ハイマツの生育が過去の文献に記録されている最南限の場所では、今回の調査ではハイマツの生育が確認できず、ハイマツの分布の南限が北上したことが示唆された。一方、文献などの情報から得た尾瀬（群馬県）の植物の開花時期の近年の経年変化に、顕著な傾向は認められず、この傾向は、開花時期に影響を与える春先の積雪深の経年変化の傾向と同様であった。

これらの結果を総合し、我が国高山帯の山頂や稜線に近く、積雪深が強風や微地形により制限される場所では、近年、気温上昇の影響が表れ始めていることが強く示唆されると結論した。

ところで、IPCC 第4次評価報告書で述べられているように、現時点では、大陸規模より小

さなスケールの気温変化については、観測結果のシミュレーションや変化の原因を特定することは未だ困難であると記述されているように、我が国高山帯での気温上昇と地球温暖化と関係が不明確な現状を考慮すると、今後の地球温暖化影響のモニタリングの方法として、次の方法が提案できる。

ステップ 1. 将来の温暖化シナリオにもとづく我が国高山帯の気象要因の変化の予測

ステップ 2. 予測された気象要因をもとにした温暖化影響モニタリング指標の変化の予測

ステップ 3. 予測された気象要因及びモニタリング指標と観察される気象要因および指標との比較検討

そのため、環境条件が厳しく、また、人里から離れた高山帯で、精度良く効率的に積雪深などの雪環境や温暖化指標の観測手法の改良・開発や観測体制の整備が必要である。また、精度良く温暖化影響モニタリング指標を予測するためには、気温の上昇と指標との関係のさらなる解明が必要である。

9 引用文献

- 1) 環境省 (2008) IPCC 第4次評価報告書 政策決定者向け要約 環境省ホームページ
- 2) IPCC (気候変動に関する政府間パネル) 編 (2001) 気候変化 2001 IPCC 地球温暖化第3次評価報告書—政策決定者向け要約— 環境省地球環境局 監修
- 3) 気象庁 (1967) 富士山頂の気象 第8号
- 4) 気象庁 (1979) 富士山頂の気象 第9号
- 5) 気象庁 (1984) 富士山頂の気象 第10号
- 6) 気象庁 (2000~2003) 2000年3月~2003年12月 47639 富士山 気象庁閲覧室データベース
- 7) 気象庁 (2004~2007) 富士山 気象庁ホームページ
- 8) 気象庁 (1980年1月~2000年12月) 高層観測統計表 気象要覧
- 9) 気象庁 (1983) Aerological Data of Japan 30-year Period Average Part 1 日本上高層資料 30年報 その1
- 10) 気象庁 (2001~2006) 高層気象観測年報 (CD版) 気象業務支援センター
- 11) 斉藤守也、入江誠 (2002) 乗鞍コロナ観測所における気象観測 国立天文台報 6:37-47
- 12) 近田文弘 (1981) 静岡県の植物群落 第一法規
- 13) 群馬県 (1979~2006) 「尾瀬の自然保護」第2号~第29号
- 14) 環境省 (2006~2008) 平成17~19年度 北岳キタダケソウ生育地保護区管理業務報告書 関東地方環境事務所
- 15) 清水基雄 (1931) 「きただけさう」を世に出すまで 登山とスキー9月号、36-39
- 16) 植松春雄 (1967) 南アルプスの植物 井上書店
- 17) 佐竹義輔・大井次三郎・北村四郎・亘理俊次・富成忠夫 編 (1982) 日本の野生植物 草本・単子葉類, 平凡社. 305pp.
- 18) 米山競一 (1985) 白山を分布の西限もしくは南限とする植物. 白山高山帯自然史調査報告書, 54-66, 石川県白山自然保護センター.
- 19) 石川県白山自然保護センター (1995) 白山高等植物インベントリー調査報告書. 石川県白山自然保護センター, 200pp.
- 20) Yashima, T., Kinoshita, E. & Shimizu, T. (1997) Flowering Phenology and Self-incompatibility in *Fritillaria camtschaticensis* (L.) Ker-Gawl. Journal of Phytogeography and Taxonomy. **45**, 129-133.
- 21) 野上達也 (1998) 融雪期のちがいによるクロユリの開花フェノロジー及び結実率への影響. 石川県白山自然保護センター研究報告, **25**, 19-23
- 22) 名取俊樹・清水庸・大政謙次・増沢武弘・東野外志男・野崎英吉・小川弘司・野上達也・林哲 (2002) 高山生態系の脆弱性と指標性の評価. 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究. 平成11年度~平成13年度 環境省地球環境研究総合推進費終了研究報告書. 27-47
- 23) Kudo, G. (1992) Pre-flowering and fruiting periods of alpine plants inhabiting a snow-bed. J Phytogeogr Taxon **40**: 99-106.
- 24) 高橋誼 (1985) アポイ岳の高山植物. 様似観光開発公社.
- 25) 気象庁ホームページ a (2008) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 26) 清水建美 (1982) キンポウゲ科キタダケソウ属. 「日本の野生植物 草本II 離弁花類」(佐竹

- 義輔・大井次三郎・北村四郎・亙理俊次・富成忠夫 編), 74p. 平凡社, 東京.
- 27) 西川洋子・住田真樹子 (2007) アポイ岳におけるヒダカソウの開花時期と地表面温度との関係. 北海道環境科学研究センター所報, 33 : 34-38.
- 28) Price, M. V., Waser, N. M. (1998) Effects of experimental warming on plant reproductive phenology in a subalpine meadow. *Ecology* 79: 1261-1271.
- 29) 気象庁ホームページ b (2008) <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/sindan>
- 30) 気象庁ホームページ c (2008) <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 31) 近田文弘 (1981) 静岡県の植物群落 第一法規
- 32) 工藤岳 (2000) 大雪山のお花畑が語ること 京都大学学術出版会
- 33) IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 996 pp.
- 34) Dozier, J. (1989) Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper, *Remote Sens. Environ.*, 28: 9-22.
- 35) Hall DK., Riggs GA., Salomonson VV., DiGirolamo NE. and Bayr KJ. (2002) MODIS snow-cover products. *Remote Sens. Environ.*, 83, 181-194.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ①西川洋子・宮木雅美・大原雅・高田壮則：日本生態学会誌, 55:99-104. (2005)
「ヒダカソウ (*Callianthemum miyabeanaum*)の主要な生育地間のサイズクラス構成の比較と個体群動態からみた生育特性」
- ②Lu, S., Oki, K., and Omasa, K.: *Journal of Agricultural Meteorology*, 60(6), 1215-1218. (2005)
“Mapping snow cover using AVHRR/NDVI 10-day composite data.”
- ③Nasu, A., Shimizu Y., and Omasa K: *Journal of Agricultural Meteorology*, 60(6), 1227-1229. (2005)
“Statistical analysis of the relationship between changes in plant phenology and daily mean air temperature in Japan under climate change.”
- ④光田準、増沢武弘：日本生態学会誌, 55 : 91-97 (2005)
「北海道アポイ岳における植物の分布と土壌環境」
- ⑤W. Yamori, H. Kogami and T. Masuzawa: *Polar Bioscience*. 18:73-81 (2005) “Freezing tolerance in alpine plants as assessed by the FDA-staining method.”
- ⑥増沢武弘、光田準、田中正人、名取俊樹、渡邊定元：日本生態学会誌, 55 : 85-89 (2005)
「北海道アポイ岳の高山植物群落—カンラン岩土壌における植物群落の遷移」
- ⑦名取俊樹：地球環境11:1 21-26 (2006)
[温暖化の高山植物への影響—温暖化影響モニタリングの可能性]
- ⑧A. Kagawa, N. Fujiyoshi, M. Tomita & T. Masuzasa: *Polar Bioscience* 20:92-102 (2006)
“Mycorrhizal status of alpine plant communities on Mt. Maedake Cirque in the Japan South Alps”.
- ⑨Y. Naganuma, H. Sakio & T. Masuzawa: *Jpn. J. For. Environment* 48:77-84 (2006)
“Comparison of community structure and growth between the alpine dwarf shrubs *Rhododendron aureum* and *R. brachycarpum* on the Yastugatake range, central Japan.”
- ⑩T. Natori : *Global Environmental Research* 10(2) 161-166 (2006)
“Impacts of global warming on alpine plants growing in the Japanese alpine zone and possibility of monitoring global warming impacts with alpine vegetation. ”
- ⑪小川弘司、山本憲志郎：地理学論集 No82 1-9 (2007)
「白山山頂部における階状土・ロウブ状地形の分布特性」
- ⑫増沢武弘、富田美紀、長谷川裕彦：日本生態学会誌58 : 191-198 (2008)
「南アルプス荒川岳南東面における氷河地形と植物群落」
- ⑬波多野肇、増沢武弘：日本生態学会誌58 : 199-204 (2008)
「白馬山系蛇紋岩地の土壌特性と高山植物群落」
- ⑭名取俊樹：日本生態学会誌58 : 183-189 (2008)
「南アルプス北岳のキタダケソウの生育に及ぼす地球温暖化の影響」

(2) 口頭発表

- ①小川弘司：第11回雪形ウォッチング 国際雪形研究会・日本雪氷学会北信越支部主催 (2005)
「白山の自然と雪について」

- ②清水庸・大政謙次：日本農業気象学会2006年春季大会，千葉大学。（2006）
「日単位積雪深の簡易推定モデルの作成」.
- ③那須翔・清水庸・大政謙次：農業環境工学関連7学会2005年合同大会 金沢大学。（2005）
「植物季節の発現日変化と日単位気温の統計解析」
- ④野上達也・畑中康郎・木下栄一郎：第53回日本生態学会大会（2006）
「白山の多年生草本植物クロユリの個体群動態」
- ⑤名取俊樹：第53回日本生態学会大会（2006）
「地球温暖化の指標としてのハイマツの年枝生長」
- ⑥加藤健一、富田美紀、長谷川裕彦、佐々木昭彦、大野啓一、増沢武弘：日本植生学会第11回大会（2006）「南アルプス中・南部の高山植物群落」
- ⑦増沢武弘、富田美紀：第53回日本生態学会シンポジウム（2006）
「八ヶ岳・南アルプスの高山植物群落の特性」
- ⑧松田高政、清水庸、大政謙次：農業環境工学関連学会2006年合同大会（2006）
「北海道におけるMODISデータを用いた積雪域の推定」
- ⑨清水庸、星加康智、大政謙次：日本農業気象学会2007年春季大会（2007）
「日本における温暖化時の生物季節予測マップの作成」
- ⑩小川弘司、伊藤文雄：日本地理学会春季学術大会（2007）
「千蛇ヶ池雪溪の長期モニタリング」、
- ⑪ 松田高政・清水庸・大政謙次：農業環境工学関連学会 2007年合同大会（2007）
「日本における MODIS データを用いた積雪指標の閾値の解析」
- ⑫ 小川弘司、伊藤文雄：2007年度日本雪氷学会全国大会（2007）
「白山千蛇ヶ池雪溪の変動と気象との関係」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

① 岳人 2005年 2号 東京新聞出版局

②名取俊樹が2005年度国立環境研究所公開シンポジウム（2005年6月12日東京、6月25日京都）のポスター講演で「わが国の高山植物と温暖化影響ーキタダケソウを例としてー」に成果の一部を発表

③名取俊樹が新聞赤旗の取材を受け、2005年7月31日版に「温暖化に終われる高山植物 キタダケソウ50年後は消滅？」として報道された。

④小川弘司が「白山の万年雪、千蛇ヶ池雪溪の変動」を県民白山講座第3回「白山と温暖化」（2005年10月30日開催）石川県（白山自然保護センター）主催で講演

⑤名取俊樹（2008）2008年1月1日 東京新聞 群馬地域の情報、「ミズバショウ教える危機」の中で、取材を受けた記事が載った。

⑥白山自然保護センター（2007）平成19年度クロユリの開花状況 白山自然保護センターホー

ムページ <http://www.pref.ishikawa.jp/hakusan>

- ⑦小川弘司・野上達也（2008）白山が伝える温暖化 社団法人いしかわ環境パートナーシップ県民会議
- ⑧ 名取俊樹が、2008年7月4日のNHK「首都圏ネットワーク」内環境シリーズなどで南アルプスの北岳で見られる、もしくは今後考えられる地球温暖化の影響についての取材が放映された

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

[査読がない誌上発表]

- ① 増沢武弘、富田美紀、沢村佐知子、加藤健一、長谷川裕彦：Reports of the faculty of science Shizuoka University 39:11-18（2005）
「南アルプス荒川三山の分布する高山植物群落と氷河地形」
- ② 増沢武弘、加藤健一、富田美紀、長谷川裕彦、名取俊樹：Report of the Faculty of Science, Shizuoka University、40:71-82（2006）「南アルプス中央部における高山草本植物群落」
- ③ 増沢武弘、加藤健一、富田美紀、佐々木明彦、長谷川裕彦：Report of the Faculty of Science, Shizuoka University、40:57-70（2006）「南アルプス荒川岳南東面における氷河地形と植物群落」
- ④ 野上達也：白山の自然誌 2 6 21pp（2006）
「白山のクロユリ」
- ⑤ 小林和彦、桑形恒男、広田知良、近藤純正、清水庸、見延庄士郎：生物と気象7（2007）
「地球温暖化の実態とそれが生態系と農業活動に及ぼす影響」
- ⑥ 小川弘司：はくさん 34-1：7-12（2006）白山の万年雪、
「千蛇ヶ池雪渓の変動」
- ⑦ 野上達也：石川県白山自然保護センター、21（2006）
「白山の自然誌26 白山のクロユリ」
- ⑧ 野上達也：はくさん 34-4：2-6（2007）
「平成18年豪雪と白山のクロユリの開花の遅れ」
- ⑨ 西川洋子・住田真樹子：北海道環境科学研究センター所報、33：34-38（2007）
「アポイ岳におけるヒダカソウの開花時期と地表面温度との関係」