

B-12 地球の温暖化が植物に及ぼす影響の解明に関する研究

(2) 山岳地における植生帯の移動条件に関する調査研究

① 温帯地域における調査研究

研究代表者 森林総合研究所森林環境部 埴田 宏

農林水産省林野庁森林総合研究所

森林環境部	立地環境科	立地評価研究室	小林繁男・酒井寿夫・田中永晴・藤本潔
生産技術部	育林技術科	更新機構研究室	田中信行
東北支所	育林部	土壌研究室	池田重人
		多雪地帯林業研究室	梶本卓也
	経営部	防災研究室	大丸裕武
十日町試験地		小南裕志	
木曾試験地		森澤 猛	

平成5 - 7年度合計予算額 32,223千円
(平成7年度予算額 10,591千円)

[要旨] 地球の温暖化が我が国の山岳地の植生に及ぼす影響を予測するため、秋田駒ヶ岳、奥秩父山地、赤石岳などの高山・亜高山帯を中心に、現在及び過去の植生が成立する環境要因を調査した。降雪及び融雪過程のモデル化と雪田植生の植物季節に及ぼす影響、土壌有機物の分解促進などの調査結果から気温の上昇がもたらす影響を予測することが可能になった、ハイマツ群落の成長速度の測定結果など、気温の上昇が群落の消長に直接結び付かない現象も観察され、土壌凍結などの土地的要因の変化が重要であるとの結論を得た。

[キーワード] 温暖化影響、亜高山帯、積雪環境、植物季節、土壌条件

1. 序

地球温暖化を地域生態系の変動という観点から見れば、現在の植生帯が高緯度、または、高標高へ移動する圧力となる。現在の山岳地植生は晩氷期から温暖期をへて寒冷期に至った気候変動の影響を反映しているとされているが、急峻で山頂部面積の狭い我が国の山岳地形では、高山帯・亜高山帯の植生の移動先となる場所が少なく、その成立立地を失う可能性があり、低地に比べて大きな影響を受けると考えられる。

温量指数や最低気温等の温度条件による現在及び将来の植生帯分布の説明は、それぞれの植生帯が連続して存在し、境界部では競争が生じていることを前提としている。例えば、ブナ林の下限が温量指数85である理由は、アカガシ林やウラジロガシ林の成立限界がその位置にあり、それより温暖な場所では競争力に優るカシ林が成立することによる。種としてのブナの生育可能範囲は、より広範囲である。現在の山岳地の森林は自然林ばかりでなく、スギ、ヒノキ、カラマツ

等の植林，極相林の構成種を欠く二次林，スキー場や放牧地等の草地等が少なくない。したがって，過去の温暖期と同様の植生帯移動が生じる場所は，現在では少ないと考えられる。

高山・亜高山域では，気温よりも風や積雪の影響が大きいと考えられる場所が少なくない。シラベ，コメツガ林などの高木林が成立する森林限界は温量指数で15，夏季（7，8月）の平均気温で12℃とされているが，ハイマツなどの低木群落や高山草原は，より低い場所にも出現している。風衝，積雪（過大，過少），土壤の過湿，乾燥または凍結などの環境が高木林の成立を妨げると，低木群落や草原，高山荒原が成立する。高木林より標高が低い地点にハイマツ群落が発達する例を示すと，木曾御岳山の田の原では過湿地に，秩父山地の金峰山では岩石地に，秋田駒ヶ岳では土壤凍結が生じる場所などが挙げられる。これらの場所では温暖化が進行したとしても，高木林に移行する可能性は低い。

2. 研究目的

本研究の目的は，山岳地の植物群落（森林，低木林・雪田植物群落，岩屑植物群落）と，それらが成立する気候条件（積雪，風，雨，霧，気温等），土地条件（地質，地形，土壤等），生物条件（競合種，動物との関係等）との関係から，各種植物群落の成立条件を解明し，気候変化がこの地域の植物群落に及ぼす影響を推定することである。気候温暖化の影響は，気温の上昇が植物の生育に直接影響するほか，降水量，積雪条件，土壤中の水分・有機物の分解速度等の変化を通じて植生の内容に変化を引き起こす。本研究では，主要な環境要素と植生の対応について，両者の関係を調査するのに最も適した場所を選んで調査を行い，それぞれ成果を総合して山岳地の植生の特徴と環境変動の影響を考察することとした。まず，積雪環境の歴史的変動を雪田の土壤から調査し，雪田草原の成因と針葉樹林の発達について検討した。次いで，亜高山帯山頂部における今日の植生分布には土壤凍結の影響が大きいことを明らかにし，雪田の融雪過程と植物季節との関係を論じた。今後，この地域で温暖化が進行した場合の影響については，ハイマツ低木林の構造と成長，亜高山帯針葉樹林の土壤条件の変化を中心に検討した。また，温暖化に伴う積雪量の変化についても長年の実測データから推定を行った。

(1) 積雪環境の歴史的変動と雪田草原

日本の中部・東北地方の山岳は中緯度としては世界でも屈指の豪雪地帯であり，また冬季の季節風の強さは世界でも第1級のものといわれている²¹⁾。冬季の強風は，著しく不均質な積雪深分布をもたらして，植生の分布に大きな影響を与えている。積雪は，日本の山岳の植生の分布に影響を与えている最大の環境要因の一つであるが，その歴史的変動については，ほとんど考慮されてこなかった。気温の変動による植生帯の上下変動の可能性，あるいは花粉分析のデータに基づいた，植生の成立史³⁸⁾など，気温の変化に関する限り，歴史的な考察の重要性は広く認められつつあるにも関わらず，積雪深の時間的な変動がこれまでほとんど考慮されてこなかった。これは，気温に比べて，積雪深や降雪量を復元することが技術的にきわめて難しく，過去の降雪量の変動をに関する資料がきわめて少ないことに原因がある。

(2) 奥羽山地の亜高山帯山頂部における植生分布と土壤凍結

地球規模の温暖化に対して山岳地の植生がどのような影響を受けるかを予測するためには，まず第一に現在の植生分布と気候や環境条件との対応関係を明らかにしておく必要がある。温量指

数などにより大まかな気候条件との関係はほぼ明らかになっているが、未解明で重要な課題もいくつか残されており、東北地方に限ってみても、亜高山針葉樹林帯が欠ける、いわゆる「偽高山帯」の問題がある。このことについては古くから議論されてきた¹²⁾³⁶⁾が、いまだに定説といえるものはない。したがって、地球温暖化が山岳地の植生に与える影響を考えると、この原因を考慮に入れて予測することが必要となる。そのためには、亜高山針葉樹林（ここではアオモリトドマツ林）が成立できない理由を説明することが重要な課題となる。

(3) 雪田における雪線後退と植物季節

冬季の季節風の影響により雪庇が発達するところでは、夏まで雪が融けずに残る雪田が形成され、独特の雪田植生が発達する。雪田植生の生育期間は積雪・融雪の具合により大きく変化する。しかし、この環境を定量的に扱った例は未だに多くない。ここでは、1993年の秋田県笹森山の雪田における消雪過程と植物の生育過程の観測結果より、雪田周辺の環境と植物季節について検討する。

(4) 奥秩父、金峰山のハイマツ低木林の構造および成長に及ぼす環境要因の影響

高標高地に生育する針葉樹の生長や光合成生産は、環境要因の中でもとくに気温や地温等温度条件に大きく左右される⁴⁷⁾⁴¹⁾。とくに樹林限界付近の樹木は、低温とともに短い生育期間によりクチクラ層が十分発達できず、新梢部は冬季の乾燥害を受けやすい状態にある³⁾⁴⁰⁾⁴²⁾。また亜高山性針葉樹の場合、その更新過程も夏期の温度条件に大きく依存しており、北方域の樹林限界付近では比較的温暖な時期に集中的に実生が定着し、その結果分布域の高度が上昇しつつある事実が報告されている²²⁾³¹⁾。ここでは、比較的積雪の少ない奥秩父、金峰山において、環境条件がハイマツ低木林の構造および成長に及ぼす影響を検討する。

(5) 温暖化が亜高山帯針葉樹林の立地環境に及ぼす影響

気温の増加と乾燥化は直接降雪量や融雪時期に影響する。さらに温度上昇と乾燥化はリターの分解速度やリター蓄積、土壌腐植の形成にも大きな影響を与え、その結果、土壌特性が大きく変換することが予想される。これら土壌特性の変化は植物群集、特に実生や稚樹の成長にも影響を与えるものと考えられる。赤石岳においてはコメツガは標高2200m以上でポドゾル性土壌に対応して出現する。標高差のある調査地を設定することにより温暖化の影響はより効果的に短い期間で試験することができるので、異なる標高での立地環境と植生の特徴、気温・地温・土壌水分・降雨量などの微気象と標高、コメツガ・リターの分解速度と微気象との関係を明らかにし、温暖化等の気候変化による立地環境の変化を予測する。

(6) 暖地性積雪地域における積雪変動と気温の関係

北陸地方の暖地性積雪地域においては降雪期においても気温の低下は顕著ではなく、積雪の形成が雨・雪のしきい値に近い温度範囲でおきており、積雪量の変動はその多くを気温の変動量によって決定されていることが考えられる。冬季の降水形態と地上における気温の関係については天気予報、送電線への着雪等の用途から多くの研究がなされており、固体降水の発生確率が50%になる地上気温(T50)を雨雪の判断基準にするものが一般に用いられている。新潟県十日町市において1963年から1994年までの31年間の積雪水量、降水量、気温を用いてT50と融雪係数の値を推定し、この値の年変動を求め、気温-降水量を用いて各年度の1日毎の積雪水量の変化を予測する。

3. 研究方法

(1) 積雪環境の歴史的変動と雪田草原

雪渓周辺の土壌調査から約2千年前以降の雪渓の規模を復元し、降雪量の変動との関係を調査した。また、筑森山の雪田草原において1994年に光ファイバー式積雪深計を用いて、表面融雪量を測定し、サーミスタセンサー付きデータロガーを用いて気温の計測をおこない、融雪過程のパラメータを得た。

(2) 奥羽山地の亜高山帯山頂部における植生分布と土壌凍結

奥羽山地の八幡平から秋田駒ヶ岳にわたる地域のなかで、源太ヶ岳、湯森山、茶臼岳の3ヶ所で調査をおこなった。比較的近い山岳の間でも山頂付近の植生はそれぞれかなり異なった性格を持っている。ここでは、多様な植生型と土壌凍結の対応関係はおもに源太ヶ岳で調査したが、積雪深と土壌凍結の関係については、冬季の調査を比較のおこないやすい湯森山で調べた。また、茶臼岳では植生と土壌凍結の対応関係を補足的に調査した。

(3) 雪田における雪線後退と植物季節

調査地は秋田県筑森山(1541m)山頂から北東へおよそ80m離れた位置の東向き斜面、標高1520~1500m付近に設けた。調査地とその周辺の植生は、東北地方の代表的な雪田植生であるヒナザクラ・イワイチョウ群集に分類されている。1993年夏に雪田植生の主な種について生育状況と消雪過程の調査を行なった。これは、雪線の後退により地表面が現われた日をその地点の消雪日としてそれ以降その地点の植物の生育状況を追跡調査するという手法を調査地内にて何地点かくり返し行なった。また、山頂に気象測器を置き、気温・湿度・全天日射量・風速を測定した。また、調査地内の標高1510mの地点で地温(10cm)を測定した。

(4) 奥秩父、金峰山のハイマツ低木林の構造および成長に及ぼす環境要因の影響

奥秩父連峰、金峰山(標高2595m)一帯は、他の中部山岳地帯と同様、山頂付近にハイマツが優占し、それより下部にシラベ、オオシラビソ、コメツガなどで構成される亜高山帯針葉樹林が分布している。本研究では、山頂付近のハイマツ林を対象に、南北各斜面の標高が異なる地点にそれぞれ3ヶ所ずつ調査プロットを設定し、林分構造や生産力の推定を行った。

(5) 温暖化が亜高山帯針葉樹林の立地環境に及ぼす影響

調査地は静岡県赤石岳の榎島から富士見平に至る小赤石尾根に設定した。標高は1120m(榎島)から2725m(富士見平)の範囲にある。赤石山脈はおもに中生代の堆積岩からなり、四万十帯の活動により形成された。気温は地形や標高によって変わるが標高2000mでは年平均4℃から5℃であった。年降水量は同標高でおよそ2600mmであった。7つの固定プロットは標高1120m, 1560m, 1840m, 2130m, 2470m, 2560m, 2725mに設置し、標高の低い方からプロット1~7と名付けた。森林のタイプとしてはカラマツ林、ミズナラ林、コメツガ林、シラベ林、オオシラビソ林、ハイマツ林が見られた。

気温・地温・土壌水分環境・降水量等の微気象のデータはデータロガー(KADEC, KONA System)を用いることにより記録した。その他、7つの各プロットにおいて林分構造、林分の成長量、林床植生、リター分解速度(リターバッグ法)を計測した。リターバッグにはコメツガの葉

40gと枝10gを詰め、毎年10月に5個ずつ回収し、重量によってリター分解速度を測定した。

(6) 暖地性積雪地域における積雪変動と気温の関係

北陸地方の暖地性積雪地域の新潟県十日町市において1963年から1994年までの31年間の積雪水量、降水量、気温を用いてT50と融雪係数の値を推定し、この値の年変動を求め、気温-降水量を用いて各年度の1日毎の積雪水量の変化の推定を行った。次に1994年と1995年の2年間について、最も正確に融雪量を推定できると考えられる熱収支法と気温のみで簡便に融雪の推定を行うdegree-day法の比較を行い、気温のみで融雪を推定した場合の妥当性の評価と気温-降水量モデルを用いて平均気温の上昇に伴う積雪量の変動の予測を行った。

4. 調査結果

(1) 積雪環境の歴史的変動と雪田草原

笹森山の雪田草原で、融雪期の気温と表面融雪量との関係から、以下の近似式を求めた。

$$M = 0.67WI \quad (M: \text{表面融雪量(mm)}, WI: -3^\circ\text{Cを基準とした日積算温度})$$

この式を用い、秋田県横手の気温から算出した、笹森山の過去30年間の推定平均気温を基準として、気温が変化した場合の融雪速度の変化を明らかにした。さらに、気温の変化が7月中旬(7月15日)の残雪の形態に与える影響をみるために、2次元シミュレーションを行った。この結果をみる限り、2℃の気温の変化によって引き起こされる、7月15日の雪線の移動量は、5m程度であり、実際に観測された雪線の年変化の量の数分の1に過ぎない。7月15日の残雪線の位置は、融雪前の吹きだまりの大きさによってほぼ決まり、雪線の変化に与える気温の効果は、2℃程度の大きな気候変化でも、相対的に小さいことがわかる。このことは、実際の観察でも確認された。1993年の夏は東北日本では過去50年間で最も寒冷であったが、冬季の積雪量が小さかったため、7月中旬頃の残雪は酷暑であった1994年よりも小さかった。

埋没泥炭が形成された10世紀頃の、7月中旬の残雪は埋没泥炭の分布域の内側にあったと考えられる。1995年7月中旬の残雪域はこの条件を満たしており、1995年のような気候条件が続けば、雪田表層の泥炭の形成域は10世紀頃なみに拡大しうるといえる。1995年は、東北地方では比較的冷涼な夏であり、7月の残雪規模が小さかったのは、気温ではなく冬季の吹きだまりが小さかったことに原因がある。

(2) 奥羽山地の亜高山帯山頂部における植生分布と土壌凍結

源太ヶ岳：ラインに沿った植生分布断面と1992年秋～1995春まで3冬期の最大凍結深の調査によると、ハイマツ群落下では深いところで40cm以上にわたり表層土壌が凍結しており、凍結深は群落高が低いほど大きい傾向が認められた。そのほかの植生では土壌凍結はないか、あっても3cm以内に限られていた。また、凍結深は年によってやや変動するものの、凍結箇所は3年ともまったく同じだった。1992年11月～1993年9月の期間おこなった表層地温の計測結果によると、ハイマツが生育するところでは表層地温が0℃未満になる期間があり、最大凍結深計による結果と一致していた。そのほかの植生では表層地温が0℃未満になることはほとんどなかった。最も地温が低下した地点では、約半年のあいだ表層地温が氷点下の状態にあった。また、そ

のほかの植生にくらべると温度の変動が非常に大きく、冬は -10°C 以下、夏は 35°C 以上にもなることがあった。

湯森山：チシマザサ群落の一部を除くすべての地点で表層土壌が 10cm 以上凍結しており、源太ヶ岳にくらべてさらに厳しい温度環境にあった。凍結深が大きいところは積雪深が小さいところとほぼ一致していた。また、ここでも源太ヶ岳と同様に、最も凍結が進むところでは、6月上旬に深さ 30cm 付近の土壌が凍結しているのが観察された。

茶臼岳：山頂周辺に生育する代表的な植生を選んで、1993年秋～1995年春の2冬期の最大凍結深を調査した。ハイマツやコメツガが優占する植生下では表層土壌が凍結しており、その凍結深は大きいところで 40cm 以上に達していた。アオモリトドマツ林では1993年秋～1994年春はほとんど凍結しなかったが、1994年秋～1995年春では $7\sim 8\text{cm}$ の凍結が認められた。

(3) 雪田における雪線後退と植物季節

調査地における消雪以降の時間経過とヒナザクラ、イワイチョウ、ゼンテイカの生育段階の変化を図化した。ヒナザクラは休眠芽が地表面にあるため、消雪日と生育段階が発芽になる日が同一である。ヒナザクラは日数とともに生育段階が進んでいき、消雪日が遅いところのものほど発芽から結実に到るまでの期間が短い。イワイチョウはヒナザクラとは違う生育パターンを示す。7月7日以前に消雪した地点の個体は葉の展開後すぐには花芽を形成せず、7月19日以降にそろって花芽を作り、7月30日に開花した。それに対し7月10日以降に消雪した地点の個体はヒナザクラと同様の生育パターンを示している。ゼンテイカはイワイチョウと同じような成長パターンをとることがわかった。しかし、開葉・開花に到るまでの日数がイワイチョウよりも長くなっている。

調査期間中これらの植物がどのような環境条件で成長していたかを検討するために、大谷ら³⁰⁾の手法により、植物の成長過程に対する有効積算温度を求めた。有効積算温度は深さ 5cm の地温の日平均と 5°C との差が正の場合に積算していく方法をとった。気温ではなく地温を用いた理由は、日平均地温と日平均気温の間にほぼ $1:1$ ($r^2=0.94$)の相関があったことと、雪田の下方斜面のように地温が融雪水の影響を受ける場所でも適用できるからである。これらにより、ヒナザクラ、イワイチョウ、ゼンテイカの生育段階の変化と有効積算温度との関係を図化した。ヒナザクラでは、消雪時期が遅い地点の個体を除き、結実に到るまでの有効積算温度が $200^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ 弱で大体そろっている。イワイチョウでは消雪時期が早い地点の個体は、結実までの有効積算温度が約 $300^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ であるが、消雪時期が遅くなるにつれて有効積算温度が段々と小さくなり、最後に消雪した地点の個体では結実までの有効積算温度は約 $170^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ になっている。また、ゼンテイカは開花に到るまでの有効積算温度が $240\sim 300^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ で、前段と同様にイワイチョウと似た形になっている。

(4) 奥秩父、金峰山のハイマツ低木林の構造および成長に及ぼす環境要因の影響

林分構造：地際直径や幹長など地上幹の平均サイズは、地上幹の密度が低いプロットで大きかった。梢端部のシュートにおける幹の年平均伸長量は $1.4\sim 2.0\text{ cm y}^{-1}$ の範囲にあり、斜面方位や標高の違いによる顕著な差はみられなかった。この平均伸長量で幹長を除いて求めた林分地上部の平均年齢は $26\sim 55$ 年と推定された。地上部現存量は、南向き斜面の3プロットで $27\sim 40\text{ ton ha}^{-1}$ に達し、北向き斜面の3プロットでの推定値 $12\sim 33\text{ ton ha}^{-1}$ を上回った。葉面積

指数 LAI の推定値も、南斜面 ($2.4 \sim 4.0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) の方が北斜面 ($1.7 \sim 2.6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) のプロットより大きかった。同一斜面では、標高が低いプロットほど現存量や LAI は大きくなる傾向にあった。各プロットの葉群下で測定した光量子密度 (PFD) の相対値は、北斜面で 18~31%、南斜面で 15~25%であった。この林床の光条件を示す PFD の相対値は葉面積指数とほぼ反比例の関係にあり、LAI の大きいプロットで小さくなる傾向が認められた。

環境要因と生産力：夏期の各月 (7~9月) について求めた日平均光量子密度 (PFD) については、北斜面と南斜面の間でほとんど差がみられなかった。測定期間中 (6~10月初旬, 127日間) の積算光量子密度の値も、南斜面 (3799 mol m^{-2}) の方が北斜面 (3681 mol m^{-2}) より 3% 多いただけであった。一方、夏期 3ヶ月間の温度条件については、南斜面の方が北斜面よりも林内気温で $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 、地温で $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 高かった。両プロットの温量指数は、約 $20^\circ\text{C} \cdot \text{月}$ と計算された。林分生産力の指標として、年間の非同化部成長量と葉の生産量を推定した。幹と枝の合計現存量を地上部林齢で除して求めた非同化部の年平均成長量は、南斜面のプロットの方が ($0.5 \sim 0.6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) 2 倍程度北斜面 ($0.2 \sim 0.4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$) より大きかった。一方、当年生葉の現存量に等しいと仮定して求めた葉の年間生産量も、南斜面の方が北斜面よりも若干大きいことがわかった。

(5) 温暖化が亜高山帯針葉樹林の立地環境に及ぼす影響

気象と標高：気温は赤石岳の小赤石尾根で標高にしたがって変化した。11月の気温については標高が高くなるにしたがってほぼ遞減率に近い値で直線的に減少した。5月と6月では標高の一番高いプロット7の気温はプロット5や6の気温よりも高く、2月と3月ではプロット3よりもプロット4、5の方が気温が高かった。これらの気温の逆転は、微地形と植生の相違が原因と考えられる。さらに、12月から3月にかけてはプロット3から7では 0°C 以下で気温が推移した。地温はプロット7を除いては標高の高くなるにつれ明確に減少していった。プロット7のハイマツ林はプロット1から6の高木林とは異なり背丈が低く樹冠の密度も小さく、背が高く密度の大きい高木林の樹冠に比較し林床への光の到達量が大きい。そのため、プロット7では地温がやや高めに観測されるものと考えられる。亜高山帯における年間の地温の変化は3月に上昇し始め、10月に減少し始めるといった典型的なパターンを見せる。地温は3月から10月のコメツガ・リターの分解に大きく影響する。11月から4月にかけて地温は 0°C 以下になり、土壌は凍結していると考えられる。

土壌環境と標高：pHの値は標高に高くなるにしたがって小さくなる。標高の高い場所では表層土壌が強い酸性になっているために、ポドゾル性土壌がそこに分布するようになる。表層土壌の全炭素量は、プロット7以外では標高が高くなるにしたがって増加する傾向があった。これは、有機物の分解が遅く、それだけの有機物が土壌に蓄積されているということを示唆する。表層土壌において pH の値が低いこととかなりの量の有機物が蓄積されているという2つの条件はポドゾル性土壌の形成を促進する⁵⁾。それゆえに、亜高山帯の土壌環境の変化は、温度の上昇が土壌有機物の分解促進と表層土壌の pH 値の上昇という現象によってもたらされると考えられる¹⁾³²⁾。

コメツガ・リターの分解：温度・水分環境はリターの分解に大きく影響する。そして高い温度条件と十分な水分によりリターの分解は促進される。コメツガの針葉と小枝の分解速度は標高

の低いところで速く、高いところで遅かった。ただし、土壌のフロラ・ファウナの影響と考えられが、プロット3と4ではプロット2よりも分解速度が速かった。また、気温・地温と標高の関係はすでに議論してきたとおり、気温と地温は、地形と植生によってかなり影響される。それゆえに標高と分解率の関係は明確な相関関係が見られなかったものと考えられる。

(6) 暖地性積雪地域における積雪変動と気温の関係

融雪熱収支による融雪量の計算結果：1994年3月1日から4月21日と1995年3月1日から4月16日までの融雪熱収支を解析した。バルク係数は積算誤差を最小に抑えるように計算を行って $CH=CE=0.0026$ とした。融雪熱量の放射依存率は48%程度で十日町は積雪地域としては南部に位置し標高も約200mと低いいため顕潜熱の割合が大きくなっている。

気温と降水量を用いた積雪水量の推定結果：最適化されたパラメーターを使用しての積雪水量の推定を試みたところ、30年間の積雪水量の分散は22.2となり、平均最大積雪水量が782.7mmであることを考えると推定誤差は3%以下で積雪水量の再現は十分可能であり、各々のパラメーターはその年度の積雪状況を十分に表現していると思われる。多雪年度（1962～1963, 1968～1969）と少雪年度（1978～1979）の積雪水量の推定値と実測値によると、どの年度においても推定値と実測値は良い対応を示した。

5. 考察

(1) 積雪環境の歴史的変動と雪田草原

中世温暖期の気候変化は、東北地方の山岳景観にどのような影響を与えたのであろうか。

現在でも東北地方の多雪山地では、標高の上では亜高山帯に位置するにも関わらず、森林を欠いて匍匐性の広葉樹が優先する特徴的な植生景観が広く見られ、偽高山帯と呼ばれている。四手井³⁷⁾は、偽高山帯的な景観が、多量の積雪をともなう日本海側の山岳に集中していることから、積雪の移動圧が匍匐性の生活形態になれないオオシラビソの侵入を妨げていると考えた。

守田による一連の花粉分析学的研究^{33, 34)}によると、東北地方の代表的な亜高山帯針葉樹であるオオシラビソ林が急速に拡大を開始したのは、十和田-a火山灰の降下した10世紀頃であるとされている。これらの研究を受けて、杉田³⁸⁾は、オオシラビソ林を、偽高山帯的植生景観の中に現在も拡大しつつある亜高山帯林として、とらえなおしている。この約千年前の植生変化は、現在の東北地方の自然植生が完成したという点で、非常に重要なエポックであるが、なぜ、オオシラビソ林の拡大が、約千年前から複数の山岳域でほぼ同時に始まったのか、という問題は未解決である。

オオシラビソ林拡大の同時性は、背後に何らかの気候変化が関与していると考えたと説明が付きやすい。笹森山の雪田土壌から推定された、約千年前の吹きだまり量の減少は、多雪山地の山地斜面における積雪移動圧の減少をもたらして、多雪山地の斜面にオオシラビソ林が侵入・成立する上で都合の良い環境をもたらしたのではないだろうか。奥羽山地北部にある湯森山の南斜面では、笹森山の埋没泥炭土とほぼ同時期に、山地斜面の安定化が起きたことを示す露頭が見られた。斜面の傾斜が20°以下ときわめて小さく、降雨による崩壊は考えにくいことから、安定化する前の斜面の削剥は積雪グライドによって引き起こされた可能性が高い。降雪量の減少による、積雪グライドの沈静化は山地斜面の環境に大きな影響を与えるであろう。八幡平や乳頭山地

域の雪食斜面の周辺では、オオシラビソは積雪移動圧の比較的小さい、尾根型斜面に孤立的に分布している。積雪深の減少は、このように積雪移動圧の小さい場所にオオシラビソが侵入することを容易にするであろう。そして、気候変化で再び積雪深が増大しても、成長した立木は自らの力で積雪の移動を食い止めるため、森林は容易に破壊されないと考えられる。

温暖化による降雪量の減少が与える影響：降雪量が大きく減少すれば、多雪山地の積雪斜面には、オオシラビソが侵入しやすい場所がいくぶん増えるであろう。現在、偽高山帯的な景観が見られる山地でもオオシラビソ林の拡大が見られる可能性がある。ただし、現在、オオシラビソ林が成立していない山地は、月山や鳥海山、飯豊山など著しく積雪の豊富な山地が多いので、潜在的な分布域はすでに、埋め尽くされたという考え方もできる。今後はより定量的な考察が必要になるだろう。また、降雪量の減少は、夏季の残雪規模に大きな影響を与え、雪田草原の大きさや、植物種に大きな影響を与えるであろう。雪田草原の大きさそのものは、気温変化の影響が比較的小さい6月頃の雪線の位置に強く影響を受けるので、冬季における吹きだまりの張り出しの大きさが重要であり、気温上昇の影響はきわめて小さい。これに対して、7月中旬以降の残雪線の内側の鉱物質土壌に分布する、アオノツガザクラなど植物種には、夏季の気温の変動も大きな影響を与える（遅い時期の雪線ほど気温の影響を大きく受ける）。気温の変動は多くの雪田草原において、内部の種構成の変化をもたらすであろうし、降雪量の減少が伴えば、多くの雪田草原は縮小し、場合によってはササ地の拡大によって消失する可能性もある。

また、暖冬の増加が、風衝地の環境の緩和につながり、現在ハイマツなどの低木が優占する場所に、オオシラビソ林が成立すれば、風速が緩和されて積雪が補足され、吹きだまりの大きさは小さくなる。すなわち、風上側の植生ゾーンの変化によって、雪田草原が縮小することも考えられる。風衝地の環境と植生の分布・動態については池田、および梶本が別の章で考察する。

雪田草原には氷河期のレリックと呼ばれる希少種が多く含まれ、景観的にも学術的にも日本の山岳景観を豊かにしている重要な要素である。日本の山岳の雪田草原は、他の高山帯的景観と同様に、本来ならばもっと高標高に出現するべき景観が、豊富な積雪と山頂現象の影響で亜高山帯に出現しているものと考えられる。このため、雪田草原の多くは山頂部に分布しており、気候の温暖化から逃げ場のない状態にある。

(2) 奥羽山地の亜高山帯山頂部における植生分布と土壌凍結

植生分布と土壌凍結の関係：源太ヶ岳での結果が示すように、ハイマツ群落と土壌凍結箇所には明らかな対応関係が認められた。また、湯森山や茶臼岳においてもハイマツが生育しているところはかなり土壌が凍結しており、この対応関係はこの地域全体に共通のものと考えられる。一方、アオモリトドマツ林については、源太ヶ岳では3年ともほとんど土壌凍結はおこらなかったのに対して、茶臼岳では数cmの土壌凍結がみられた年があった。この原因は、測定誤差であることも考えられるが、現在のところ明らかでない。秩父地方の亜高山帯でアオモリトドマツを含む針葉樹数種が混交しているところでは土壌が凍結すると推定されている²⁵⁾ことから、アオモリトドマツすなわち土壌凍結が起きないところの指標、とはならないようである。これには、針葉樹林の成立過程などが関係していると予想しているが、今後の課題である。しかし、今回の調査地に限れば、数十cmにわたって凍結するハイマツ群落とは明らかに異なった特徴を持っているといえる。チシマザサ群落については、ハイマツ群落とアオモリトドマツ林のちょうど中間的

な位置にあると考えられる。また、湯森山の山頂部に生育しているハイマツ以外の風衝植生については、ハイマツ群落と同等かそれ以上の厳しい地温環境を示す植生であると考えられる。

積雪が土壌凍結におよぼす影響：積雪深が小さいところほど凍結深が大きい、という湯森山で認められた傾向をよりくわしくみるために、4回の積雪深調査のなかでどの地点でもほぼ最大値を示した3月13日の積雪深と最大凍結深の関係を見た。やはり最大凍結深は積雪深が小さいほど大きい傾向が確認され、ごく一部を除いて積雪深が約1 mまで凍結深はほぼ直線的に減少していた。また、積雪深が1 m以上になると深くまで凍結することはなかった。

(3) 雪田における雪線後退と植物季節

生育期間が短い雪田に生育する植物の成長速度と成長パターンは種によって異なる。ヒナザクラは温度環境に依存して開花・結実する成長様式をとり、イワイチョウ、ゼンテイカは葉を展開させるまでは温度環境に依存するが、花芽形成・開花は日長反応による成長様式をとっていると考えられる。また、同じような成長様式をとるイワイチョウとゼンテイカでは、前者のほうが結実までに必要とする有効積算温度は小さい。

更に、植物季節の観測、積雪と消雪の観測、気象観測を組み合わせたモデル³⁰⁾を使うことにより、雪田における植物の生育環境を温度面である程度定量的に捉えることができた。これと植物が生育するのに必要な有効積算温度を組み合わせることにより、植物種毎に生育可能な環境を推定することが可能と考えられる。例えば、調査地ではこの年7月22日に完全に消雪したが、仮に7月30日に完全に消雪したと仮定して前述のモデルでその地点の有効積算温度を算出すると、8月31日までで約210°C・Day、9月30日までで約230°C・Dayとなる。この値ではゼンテイカは開花することも難しいと考えられる。これは7月下旬まで残雪があるところでは植生が発達しないと一般にいわれることと深く関連していると考えられる¹⁴⁾。よって、植物季節と気象データを積み重ねて調査しこの手法を用いれば、高山における植物の生育環境を把握することはある程度可能であると考えられる。また、日長反応をとっていると考えられるイワイチョウやゼンテイカはその日長反応に局地的な変異があると指摘されている。その変異を調べ、この手法を応用することにより局地的な立地条件の差異を求めることが可能になると考えられる。

(4) 奥秩父、金峰山のハイマツ低木林の構造および成長に及ぼす環境要因の影響

亜高山性針葉樹の光合成に及ぼす局所的な環境条件の影響に関する研究は、従来欧州アルプスで、とくに斜面方位の違いを比較する手法を用いてよく行われている⁴⁰⁾。例えば、亜高山性マツ2種 (*Pinus montana*, *P. cembra*) を対象に南北斜面間の純生産量を比較した研究では、地温が低く光合成期間が短く制限される北斜面に生育する個体の方が、南斜面の個体よりかなり小さいことが報告されている⁴¹⁾。またカラマツ (*Larix decidua*) の実生を用いた測定では、日平均の光合成速度は北斜面の個体で南斜面の約半分と低く、北斜面の方が南斜面より地温が2~4°C低いことがそのおもな原因と考えられている⁷⁾。これらの研究と同様に、金峰山のハイマツ林を対象とした本研究においても、林分の生産力は北斜面よりも南斜面の林分で大きく、その違いをもたらした環境要因として日射よりも温度条件、とくに地温の局所的な差が示唆された(表2)。したがって、ハイマツ林の生産力は温度条件の好転により増大することが考えられる。

亜寒帯地域のトウヒ林 (*Picea glauca*, *P. abies*) では、今世紀の比較的温暖な時期に実生が集中的に定着し、その結果樹木限界の高度が若干上昇した事実が観察されている²²⁾³¹⁾。最近

(1980年代)とくに顕著な地球温暖化の傾向を考えると⁶⁾¹¹⁾, 日本の亜高山帯においてもオオシラビソ, シラビソ, コメツガなど各針葉樹の分布域が上昇する可能性がある。一方, 本研究で得られた温度条件とハイマツの林分生産力との正の相関関係は, 温暖化が同時に本種の林分発達過程も促進することを示唆している。したがって, 亜高山性針葉樹がより高標高地に侵入, 定着できるかどうかは, 現在そこに優占するハイマツとの生育地をめぐる種間競争を検討しておく必要がある。

Kimura¹⁷⁾は, オオシラビソ, シラビソおよびコメツガで構成される亜高山性針葉樹林を対象に林床の光環境を調べ, 各樹種の実生は相対照度 5.9~6.5% で生存可能なことを明らかにしている。Kohyama²⁰⁾は, シラベ, オオシラビソの実生が生存するのに最低限必要な相対照度を 5-8%, さらに正常な成長速度を維持し, 若木の段階に達するの要する相対照度を 27-28% と報告している。一般に, このような亜高山帯針葉樹林の更新は, 林冠木の枯死, 倒木等で形成されたギャップにおいて前生稚樹の成長が促進されることを契機に始まることが多い。その結果, シラビソ林の縞枯れ更新¹⁹⁾やコメツガ林のパッチ更新¹⁶⁾のように, 比較的樹齢の揃った林分が形成される。金峰山のハイマツ林では, 林床の光環境は相対光量子密度で15~39%の範囲にあった。単純に光条件だけを考えると, 他の亜高山性針葉樹の実生はハイマツ林の林床に定着することが充分可能なことを示唆している。

Kajimoto¹³⁾は, 木曾山脈の地上部林齢が100年以上に達する成熟したハイマツ林において, その葉面積指数は $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ で, 林床のPFD 相対値は 10%以下と報告している。さらに成熟した林分では, ハイマツの各個体は伏条更新するため個体の枯死等によるギャップ形成が起こりにくいことを示唆している¹⁴⁾。このように老齢のよく発達したハイマツ林では, LAIが大きくうっ閉した葉群構造が形成され, 林床の光環境も他樹種の実生定着には必ずしも適さないこと, さらに繁殖特性上, 葉群の疎開が起こりにくいことが考えられる¹⁵⁾。一方, 本研究で対象とした金峰山のハイマツ林は, 葉面積指数が比較的小さく, 林齢も100年以下と若い林分であった。したがって, このような林分では, 上述のように他樹種の実生侵入による種間競争の展開が予想されるが, すでに成熟した林分が優占する一帯では, 森林植生の入れ替わりが進行する可能性はかなり低いと言えよう。

(5) 温暖化が亜高山帯針葉樹林の立地環境に及ぼす影響

これまでに凍結融解の周期と微地形の形成過程を考慮に入れながら高山帯と亜高山帯の気温・地温の状態について議論してきた⁸⁾³⁵⁾²³⁾。気温は, 標高にしたがってほぼ逓減率に近い値で直線的に変化するが, この試験地では逓減率は季節により変動した。気温と地温の状態は日光, 降雪, 植生, 土壌水分状態, 地形などによって直接影響を受ける。事実, 風衝地であるプロット6での地温がより高い標高のプロット7よりも低いことがあるといったようなことが観測された。

温度と土壌動物とフロラはリターの分解に影響する。これらの要素の中で温度が一番重要である。前にも述べたように, 気温と地温は標高が高くなるにしたがって減少する。それゆえに, リター分解速度は標高が高くなるにしたがって遅くなっていく。表層土壌のpHについても標高が高くなるにしたがって減少し, リターの分解速度に影響を与えている。pHが標高に依存していることは Ohsumi & Kumada²⁹⁾やNakata²⁸⁾らによって報告されている。アメリカのワイオミングとモンタナでも高山帯で標高が高くなるとともにpHが小さくなっていることが報告されている

10)。気温と地温は標高が高くなるにしたがって減少し、リター分解速度も標高が高くなるにしたがって遅くなると考えられてる³⁴⁾。これらのことから標高が高くなるにしたがって土壌水分及び土壌に蓄積される有機物は酸性になる。

(6) 暖地性積雪地域における積雪変動と気温の関係

雨雪判断しきい値の変動：雨雪判断のしきい値 T_s の値は平均値が 1.4°C でこの値長谷美の提唱した値 1.7°C 、 1.1°C によく一致しているが $0.2^{\circ}\text{C}\sim 2.2^{\circ}\text{C}$ 程度まで分散している。各年度のしきい値の変動は少なくとも日平均気温が 2°C を超えたあたりからは降水は雨で供給されていると考えられる。ここで十日町試験値の30年間の積雪期の平均気温は 0.4°C であることを考えると、 $T_s=1.4$ とすると、単純に積雪期の気温がコンスタントであるとする、気温が 1°C 上昇すると十日町の積雪は0になり、北陸域の積雪が雨雪の境界付近でおきていることがわかる。

融雪係数の年変動：融雪期の融雪係数は最大積雪水量に対して正の相関を示す。これは融雪時期が遅くなるにつれて融雪係数が大きくなることを示している。これは最大積雪水量が大きくなると融雪期が長くなり、より遅い時期まで雪が残ることを意味する。通常北陸地方においては4月に入ると冬型の気圧配置が少なくなり天候の良い日が増えてくる、またアルベドも小さくなっていくので、その結果短波放射による融雪が強調されて、同じ平均気温でも融雪量が大きくなることが考えられる。このことは全融雪熱量内の潜熱顕熱の割合が小さくなっていくことから明らかである。しかし通常、積雪地域としては温暖な北陸地方においては多雪年であっても消雪日が極端に後ろにずれることは考えにくい。そのため31年間を通した平均融雪係数(4.09)を用いたとしても推定消雪日が大きく実測値とずれるのは極端な少雪年のみである(1978年 最大積雪深 91cm; 1990年 最大積雪深 81cm, 平均積雪深 239cm)。従って十日町においては平均的な降雪年であれば平均融雪係数を用いても消雪日推定は十分可能であると考えられる。

熱収支法と気温による融雪量の日変化(融雪係数を用いた融雪推定の妥当性)：1994年と1995年の熱収支法と平均融雪係数(4.09)を用いた融雪量の日変化と実測融雪量によると、どちらの年度においても融雪係数を用いた推定融雪量は熱収支法、実測値とよい対応を示し、融雪初期のピークに関しても気温のみで十分にその波形を再現している。これは融雪熱収支解析における潜熱、顕熱の割合の高からもわかるように十日町においては融雪量全体における気温の役割が大きく、また天気が良く放射融雪が大きい場合には気温も高くなるという関係があると考えられる。従って北陸地方の低標高地域においては積雪のたい積、融解条件は気温のみを用いても十分に再現できると考えられる。

気温の上昇に伴う積雪水量の変化：気温-降水量を用いた積雪モデルを用いて平均気温の上昇に伴う積雪量の変化の推定を行った。最適化されたパラメーターが平均的で比較的多雪と少雪年の1970年と1973年について気温を $1^{\circ}\text{C}\sim 2^{\circ}\text{C}$ 上昇させた場合の積雪水量の変動を推定した。使用したパラメーターは

$$1970年 \quad T_{s1}=1.3, \quad K_2=4.9$$

$$1973年 \quad T_{s1}=1.5, \quad K_2=4.2$$

これを見ると多雪年少雪年ともに 1°C の気温上昇でも劇的に積雪水量が減少することが確認できる。

最大積雪水量について見てみると1970年度では実測値が1082mmに対し1℃で602mm、2℃で247mmまで減少するこれを積雪深に換算すると、最大積雪深時の実測積雪密度が0.44なので、これが変化しないと仮定すると、最大積雪深の実測値が246cmに対し、1℃で136.8cm、2℃で56.1cmに減少する。また少雪年の1973年については実測最大積雪水量が332mmに対し1℃上昇で86.5mmに、2℃で30.7mmに減少する。以積雪深換算では密度0.36換算で実測93cmに対し、1℃で24cmに、2℃で8.6cmまで減少する。

以上のように、北陸域の積雪は雪の供給が雨雪の境界付近でおきているため、積雪量を支配する要因の多くを気温が担っている、そのため平均気温が1℃程度上昇しただけでも積雪量は激減することが予想される。

6. まとめ

(1) 積雪環境の歴史的変動と雪田草原

降雪量の長期的変動の影響は、自然景観への影響というだけでなく、森林管理や国土保全の観点からも重要である。第2次大戦後、雪崩による山地斜面の荒廃化が進み、積雪地帯における森林の取り扱い方が大きな問題となった時期があった³⁹⁾。直接の原因として、戦争による森林の荒廃が土地条件の悪化を招いたことはもちろんであるが、日本の中部・東北地方が1960年代を中心とする豪雪の頻発期にあったことも見逃せない背景であろう。山地斜面の安定化という点では降雪量の減少はプラスの側面を持つが、同時に夏季の降水量が増加して浸食が活発化する可能性を考慮しなければなるまい。

また、首都圏をはじめ多くの都市では、水源として積雪山地の奥地にあるダムに頼っている。山地に降った多量の積雪は山地からの流出を自然に平準化し、自然のダムの役割を持っている。山地積雪の変動は水資源の問題としても、決して無視できない問題といえる。これについては、別の章で小南が詳しく考察している。

日本の山岳地における気候変動予測を行う上で最も重要なのは降水量の量と質（季節的配分や雪率）の問題かもしれない。そのためには、気候の温暖化によって、気温だけでなく、降水量の地域的分布や季節的な変動がどうなるのかが、明らかにされる必要がある。後氷期におけるわが国の山岳地の植生帯の成立を理解する上で、降雪量の変動という要素は、おそらく、気温の変化と並んで（あるいはそれ以上に）重要な要素であり、将来の気候変動予測の上でも、降雪量の変動に関する精度の高いシナリオが得られない限り、山岳域の植生について精度の高い将来予測は困難であろう。

(2) 奥羽山地の亜高山帯山頂部における植生分布と土壤凍結

湯森山での調査結果と北海道の平地でおこなわれた調査結果³⁹⁾を比較すると、北海道の平地では積雪深が15cmを越えると凍結の進行速度が小さくなり、30cmを越えると凍結は進まなかったのに対して、湯森山山頂部では積雪深が1m近く積もるところでも最大凍結深が30cmを越えるところがあった。しかし、北海道の平地の結果は経時的に調べたものであるのに対して、湯森山での凍結深は最大値のみであり、積雪深も4回の調査結果だけであるので、単純に比較することはできない。湯森山で積雪深に対して最大凍結深が大きかったのは、山頂部に位置するため強風

によって雪が吹き払われ、初冬の時期に積雪深が30cm未満である期間が長いことが考えられる。今後は、この点を明らかにする調査をおこなっていく必要がある。

源太ヶ岳の場合、土壌が凍結する範囲は5月中旬あるいは下旬までに消雪したところと一致していた。このことは、土壌凍結が積雪深に規定されていることを示唆しており、湯森山で得られた結果を支持するものといえる。

(3) 雪田における雪線後退と植物季節

1993年夏に秋田県の筑森山の雪田において、雪田植生の植物季節と雪線の移動、気象観測を行なった。その結果、ヒナザクラ、イワイチョウ、ゼンテイカの3種の植物について成長様式がわかった。また、雪線の移動と地温形成のモデルを用いることにより、前述の3種が生育するのに必要な有効積算温度を算出することができた。また、雪田とその周辺や高山における植物の生育環境を定量的に把握する手法が示唆された。

(4) 奥秩父、金峰山のハイマツ低木林の構造および成長に及ぼす環境要因の影響

本研究ではハイマツ林の温度条件と生産力の関係や、他の亜高山性針葉樹の実生定着に関連する光特性に関連するデータに基づき、地球温暖化に伴うわが国の高山、亜高山帯森林植生の今後の推移を検討した。単純に温度条件の好転だけを考慮した場合でも、現時点でより高標高地に優占するハイマツ林に及ぼす影響は、生産力の増大や葉群構造等林分の発達過程の促進など、ポジティブな効果が予想された。その結果、温度条件の変化だけでは、ハイマツ林の分布域に他の亜高山性針葉樹が単純に上昇、侵入し、置き変わっていく可能性はかなり低いと考えられた。今後は、各樹種の成長や個体群動態に及ぼす降水量や土壌条件（無機養分、水分）等他の環境要因の影響についても考慮し、検討する必要がある。

(5) 温暖化が亜高山帯針葉樹林の立地環境に及ぼす影響

もし、地球温暖化が起きたら、亜高山帯のリター分解速度はより速くなり、表層土壌の酸性の度合いもより中性に近づくと考えられる。これらのことより赤石岳における亜高山帯の立地環境は変化し、尾根上のポドゾルに分布するコマツガの立地環境は*Abies*やその他の種が容易に侵入可能な立地が変わってくるものと考えられる。

気温と地温は標高が高くなるにしたがって低くなる。しかし、この傾向は季節によって違い、また地形や植生の影響のために温度と標高の関係はリニアな関係が見られない。標高が高くなるにしたがって土壌表層のpH値は小さくなる。土壌表層の全炭素率は標高が高くなるにしたがって増加する。亜高山帯以上の森林では土壌の状態はより低いpHとより高い炭素蓄積量によって特徴づけられる。コマツガの葉と小枝の分解速度は標高の低いところで速く標高の高いところで遅かった。今後はリターの分解速度と土壌水分の関係についてより明確に検討する必要がある。

(6) 暖地性積雪地域における積雪変動と気温の関係

degree-day法と地上気温による雨雪判断を用いて地上気温と降水量のみによる積雪量の変化の推定を行い、融雪係数、雨雪しきい値気温の評価と得られた推定値の日変化の妥当性の評価を行った。積雪水量の変動から逆算された雨雪しきい値の温度は平均で1.4℃となり年度毎のばらつきはあるものの積雪水量の変動値からでも妥当なしきい値を推定することができた。融雪係数に関しては各年の変動は融雪期の時期と関係があり、消雪が遅れるほど融雪係数が大きくなることと得られた。このことは融雪熱収支の総熱量に対する潜熱顕熱の割合の変動によるものと考え

られ、融雪が進行するにつれて総融雪熱量に対する放射の影響が大きくなるのが原因であると考えられた。融雪係数を用いた融雪量の日変化について、ライシメーターによる実測値と熱収支法を用いた推定値との比較を行った結果、気温のみを用いた融雪推定法であっても十分に融雪を表現可能であった。以上のことから北陸地方の暖地性積雪地域においては気温と降水量のみを用いた非常に簡便な積雪の変化の推定式であっても十分に実用可能であると考えられる。このことをふまえて、気温-降水量による積雪変動推定法を用いて平均気温の上昇に対する積雪量の変動の予測を行った。その結果、多雪年少雪年ともに1℃の気温上昇でも非常に大きな積雪水量の減少が予想された。つまり、北陸域の積雪は雪の供給が雨雪の境界付近でおきているため、積雪量を支配する要因の多くを気温が担っており、1~2℃程度の気温の変動に対して積雪量が大きく変動することが予想された。

7. 本研究により得られた成果

(1) 中世温暖期の埋没泥炭土の形成には、気温の上昇よりもむしろ、降雪量の減少が寄与していることが推定された。このことは、完新世の気候の変化が、顕著な山地積雪量の変動を伴っていることを意味する。

(2) 微地形の調査や、積雪グライドメーターを用いた測定によって、森林を欠く傾斜が20°を越える斜面では顕著な積雪グライドが発生し、森林の分布に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。奥羽山地においては、代表的な針葉樹であるアオモリトドマツは積雪移動の影響を受けにくい斜面に侵入していることが多い。もし、気候の温暖化が降雪量の減少を伴えば、積雪移動圧が軽減されて、千年前以降から続いているアオモリトドマツの拡大に有利な環境をもたらされることが考えられる。

(3) ハイマツやコメツガあるいは風衝植生のミヤマネズなどの植生下では冬期間表層土壌が凍結しており、ところによっては40cm以上にわたって凍結することがわかった。これに対して、アオモリトドマツ林ではほとんど凍結しておらず、チシマザサ群落では凍結するところはあるものの、ハイマツなどの植生にくらべて凍結深は深くなかった。このように、山頂部周辺の植生分布と土壌凍結・積雪深との間に明らかな対応関係が認められた。

(4) 積雪深と土壌凍結との関係については、積雪深が小さいほど土壌凍結深が大きいという傾向が認められ、土壌凍結は積雪深に規定されていることが示唆された。しかし、湯森山では積雪深が大きいところでも、ほとんどのところで10cm以上にわたって表層土壌が凍結していた。

(5) 雪田植生の植物季節と雪線の移動、気象観測を行なった。その結果、ヒナザクラ、イワイチョウ、ゼンテイカの3種の植物について成長様式がわかった。ヒナザクラは開花・結実に至るまで温度環境に依存しているのに対し、他の2種は葉の展開までは温度に、花芽形成・開花は日長に依存する。

(6) 雪線の移動と地温形成のモデルを用いることにより、前述の3種が生育するのに必要な有効積算温度を算出することができた。また、雪田とその周辺や高山における植物の生育環境を定量的に把握する手法が示唆された。

(7) 温暖化がハイマツ林に及ぼす影響を検討したところ、生産力の増大や葉群構造等林分の発達過程の促進など、ポジティブな効果が予想された。その結果、温度条件の変化だけでは、ハイ

マツ林の分布域に他の亜高山性針葉樹が単純に上昇、侵入し、置き変わっていく可能性はかなり低いと考えられた。

(8) 土壌表層のpHは標高が高くなるにしたがって低下した。土壌表層の全炭素含有率は標高の一番高いプロットを除いては標高が高くなるにしたがって増加の傾向が見られた。標高とリターの初期分解速度は地形や植生などの影響によって明確な負の相関が見られなかった。

(9) 融雪係数を用いた融雪量の日変化について、ライシメーターによる実測値と熱収支法を用いた推定値との比較を行った結果、暖地性積雪地域においては積雪が極端に少ない場合をのぞいて、気温のみを用いた融雪推定法であっても十分に融雪を表現可能であった。

8. 参考文献

- 1) Berg, B., McClaugherty, C. and Johansson, M-B. (1993) Litter mass-loss rates in late stages of decomposition at some climatically and nutritionally different pine sites. Long-term decomposition in a Scots pine forest VIII. Can. J. Bot. 71: 680-692.
- 2) 大丸裕武・池田重人 (1993) 雪田の消長からみた高山～亜高山帯の気候変動. 森林立地 35: 9-14.
- 3) Delucia, E.D. and G.P. Berlyn. (1984) The effect of increasing elevation on leaf cuticle thickness and cuticular transpiration in balsam fir. Canadian Journal of Botany 62: 2423-2431.
- 4) Delucia, E.D. and W.K. Smith. (1987) Air and soil temperature limitations on photosynthesis in Engelmann spruce during summer. Canadian Journal of Forest Research 17: 527-533.
- 5) 土壌部 (1976) 日本の森林土壌の分類(1975). 林業試験場研究報告. 280: 1-28.
- 6) Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind and G. Russell. (1981) Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. Science 213: 957-966.
- 7) Hasler, R. (1982) CO₂ uptake in European larch (*Larix decidua* Mill.) near treeline in Switzerland (Stillberg/Davos). In Establishment and tending of subalpine forest: Research and management (eds. Turner, H. and W. Tranquillini), Proc. IUFRO Workshop 1984, Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Ber. 270, 113-122.
- 8) Higuchi, M. (1990) Fluctuation of air and soil temperatures through freezing and thawing periods on the bare ground of the top slope of Mt. Hoo. Geographical Review of Japan 63: 154-165. (in Japanese)
- 9) 石塚和雄 (1949) 八甲田山における積雪と植物群落との関係 - 特に雪田の植物群落について. 生態学研究 11: 193-203.
- 10) Johnson, P.L. & Billings, W.D. (1962) The alpine vegetation of the Beartooth Plateau in relation to cryopedogenic processes and patterns. Ecological Monographs 32: 105-135.
- 11) Jones, P.D., T.M.L. Wigley and P.B. Wright. (1986) Global temperature variations between 1861 and 1984. Nature 322: 430-434.
- 12) 梶幹男 (1982) 亜高山性針葉樹の生態地理学的研究 - オオシラビソの分布パターンと温暖期気候の影響 -、東大演報 72: 31-120.

- 13) 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.
- 14) Kajimoto, T. (1992) Dynamics and dry matter production of *Pinus pumila* trees growing on the Kiso mountain range in central Japan. *Ecological Research* 7: 333-339.
- 15) Kajimoto, T. (1994) Aboveground net production and dry matter allocation of *Pinus pumila* forests in the Kiso mountain range, central Japan. *Ecological Research* 9: 193-204.
- 16) Kanzaki, M. (1984) Regeneration in subalpine coniferous forests 1. Mosaic structure and regeneration process in a *Tsuga diversifolia* forest. *The Botanical Magazine Tokyo* 97: 297-311.
- 17) Kimura, M. (1963) Dynamics of vegetation in relation to soil development in northern Yatsugatake mountains. *Japanese Journal of Botany* 18: 255-287.
- 18) 小林大二・小林俊一・石川信敬 (1969) みぞによる地吹雪量の測定. *低温科学物理篇* 27: 99-106.
- 19) Kohyama, T. (1982) Studies on the *Abies* population of Mt. Shimagare 2. Reproductive and life history traits. *The Botanical Magazine Tokyo* 95: 167-181.
- 20) Kohyama, T. (1983) Seedling stage of two subalpine *Abies* species in distinction from sapling stage: A matter-economic analysis. *The Botanical Magazine Tokyo* 96: 49-65.
- 21) 小泉武栄 (1993) 日本の山はなぜ美しい, 228pp, 古今書院, 東京
- 22) Kullman, L. (1986) Recent tree-limit history of *Picea abies* in the southern Swedish Scandes. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 761-771.
- 23) Matsuoka, N. (1991) A whole year ground temperature measurement in an alpine environment of Akaishi range, Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union* 12(1): 41-49. (in Japanese with English summary)
- 24) Midorikawa, B., H. Iwaki, and K. Hogetsu (1964) Studies on the productivity and nutrient element circulation in Kirigamine grassland, Central Japan. *Climate, soil and vegetation of Mt. Kirigamine. Bot. Mag. Tokyo* 77: 260-269.
- 25) 三浦覚・池田重人・高橋正通 (1993) 寡雪および多雪亜高山地域における土壌の熱環境について. *日林講演要旨* 104: 100
- 26) 守田益宗 (1984) 東北地方における亜高山帯の植生史について I 吾妻山. *日本生態学会誌* 34: 347-356.
- 27) 守田益宗 (1985) 東北地方における亜高山帯の植生史について II 八幡平. *日本生態学会誌* 35: 411-420.
- 28) Nakata, M., Tanaka, H. and Yagi, H. (1994) Altitudinal changes in vegetation and soils on Mt. Dairoku, Central Hokkaido, Japan. *Japanese Journal of Ecology* 44: 33-47. (in Japanese with English summary)
- 29) 大角泰夫・熊田恭一 (1971) 高山土壌に関する研究. *日本土壌肥科学雑誌* 42: 45-51, 270-272.

- 30) 大谷義一・森澤猛・山野井克己・大丸裕武・後藤義明 (1995) 気候変動が雪田植生のフェ
ノロジーに及ぼす影響 1. 積雪境界線移動と地温形成のモデリング, 日本生態学会誌 45:
225-236.
- 31) Payette, S. and L. Filion. (1985) White spruce expansion at the tree line and recent climatic
change. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 241-251.
- 32) Poster, J. and Post, W.M. (1986) Influence of climate, soil moisture, and succession on for-
est carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry* 2: 3-27.
- 33) 佐伯正夫・渡辺成雄・大関義男 (1977) 豪雪地帯の急斜伐採地の荒廃. 治山 22: 157-
160.
- 34) Schinner, F. (1982) Soil microbial activities and litter decomposition related to altitude.
Plant and Soil 65: 87-94.
- 35) Sekine, K., Takeuchi, K., Kato, E. and Tazoe, Y. (1984) Annual and diurnal changes of
soil temperature on the Mt. Tateyama and the Ontake volcanoes. *Geographical Review of
Japan* 57: 663-675.
- 36) 四手井綱英 (1952) 奥羽地方の森林帯 (予報). 日林東北支誌 2: 2-8.
- 37) 四手井綱英 (1956) 裏日本の亜高山帯の一部に針葉樹林帯の欠如する原因についての一つ
の考え方. 日本林学会誌 38:356-358.
- 38) 杉田久志 (1990) 後氷期のオオシラビソ林の発達史—分布特性にもとづいて. 植生史研究
6: 31-37.
- 39) 竹内典之 (1980) 東北北海道における火山灰土の凍結と融解. 畑地土壌の凍結状況の季節変
化. 京大演報 52: 117-129.
- 40) Tranquillini, W. (1979) *Physiological ecology of the alpine timberline*. 131pp. Springer-
Verlag, Berlin.
- 41) Turner, H., R. Hasler and W. Schonenberger. (1983) Contrasting microenvironments and
their effects on carbon uptake and allocation by young conifers near alpine treeline in
Switzerland. In *Carbon uptake and allocation in subalpine ecosystem as a key to manage-
ment* (ed. Wareing, R.H.). Proc. IUFRO Workshop 1982, Oregon State University, Forestry
Research Laboratory 22-30.
- 42) Wardle, P. (1971) An explanation for alpine timberline. *New Zealand Journal of Botany* 9:
371-402.

国際共同研究等の状況

関係する国際学会への参加や研究者間の情報交換を行っているが、本課題に限定した共同研究は行っていない。

研究発表の状況

小林繁男ほか (1994) 温暖化にともなう亜高山帯立地環境の変化(1)小赤石尾根における立地環境の変化. 第105回日本林学会大会講演要旨集.

- 酒井寿夫ほか(1994) 同(2)有機物分解と植生, 地形, 微気象の関係. 第105回日本林学会大会講演要旨集.
- 池田重人・大丸裕武(1994) 多雪山地亜高山帯の植生分布と土壤凍結. 第41回日本生態学会講演要旨集. p. 79.
- 大丸裕武・小野寺弘道・松岡広雄・北田正憲・大原偉樹(1993) 東北地方北部秋田～宮古間の厳冬季の雪質の分布. 雪氷55(3): 207-212.
- 大丸裕武・池田重人(1993) 東北北部の4つの雪田にみられる土壤の時代変化. 日本地理学会春季大会予稿集, pp. 166-167.
- 大丸裕武・池田重人(1993) 雪田の消長からみた高山～亜高山帯の気候変動. 森林立地 35: 9-14.
- 大丸裕武・池田重人・大谷義一・森澤猛(1994) 奥羽山脈筑森山の雪田草原土壤に記録された気候変動. 1994年日本雪氷学会全国大会予稿集. pp. 157.
- 森澤猛・大丸裕武・大谷義一(1994) 雪田における雪線後退と植物季節(Ⅱ)1993年秋田筑森山での観察例. 日林論, 105: 601-602
- Kajimoto, T. (1994) Aboveground net production and dry matter allocation of *Pinus pumila* forests in the Kiso mountain range, central Japan. *Ecological Research* 9: 193-204.
- Kajimoto, T. (1994) Seasonal patterns of growth and photosynthetic activity of *Pinus pumila* growing on the Kiso range, central Japan. *Proceedings- International workshop on subalpine stone pines and their environment, 1992, St.Moritz.* pp.93-98.
- 以下は, 本研究費による成果をまとめた出版物 Omasa, K., Kai, K., Taoda, H., Uchijima, Z. and Yoshino, M. (eds.). (1996) *Climate Change and Plants in East Asia.* 215pp. Springer. 所載のものである。
- Daimaru, H. and Ikeda, S. (1996) Climatic change and snow patches, revealed by soil stratigraphy around the nivation hollows.
- Kajimoto, T. Kurachi, N. Chiba, Y. Utshgi, H & Ishizuka, M. (1996) Effects of external factors on growth and structure of *Pinus pumila* scrub in Mt. Kinpu, central Japan. pp.149-156.
- Kobayashi, S., Sakai, H., Tanaka, N. & Fujimoto K. (1996) Effects of environmental conditions on the site dynamics of subalpine forest in the Akaishi Mountains, Japan. pp.157-166.
- Ohtani, Y., Morisawa, T. Yamanoi, K., Daimaru, H. & Goto, Y. (1996) Modeling of snowmelt and soil temperature evolution in subalpine snow patch. pp. 167-174.
- Tanaka, N. & Taoda, H. (1996) Expansion of elevational distribution of beech (*Fagus crenata* Blume) along the climatic gradient from the Pacific Ocean to the Sea of Japan in Honshu, Japan. pp. 175-184.