

B-11 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究

(3) 森林生態系の脆弱性評価に関する研究

① 寒温帯植生の積雪変動に対する感受性の評価と影響予測

独立行政法人森林総合研究所

東北支所	温暖化影響チーム	池田重人
	森林修復チーム	杉田久志
	育林技術研究グループ	梶本卓也
	森林生態研究グループ	関 剛
九州支所	山地防災研究グループ	大丸裕武
立地環境領域	土壌特性研究室	岡本 透
東北大学大学院工学研究科		風間 聡

平成 11～13 年度合計予算額 20,379 千円
(うち、平成 13 年度予算額 7,780 千円)

[要旨] 温暖化により寒温帯植生がどのような影響を受けるかについて、積雪環境条件および植物の時間的・空間的な分布の解析等を通じて研究をおこなった。本課題では、おもに東北地方の亜高山帯の森林を中心に調査し、その結果をもとにして温暖化影響予測地図作成まで実施した。東北地方における寒温帯の代表種であるアオモリトドマツの分布変遷について、花粉分析法を用いた解析をおこなった結果、多雪地域の奥羽山地やより少雪の北上山地のいずれにおいても、1000 年前以降急速に拡大する傾向が確認されたが、北上山地については調査点数が不十分である。アオモリトドマツと積雪環境条件について調べた結果、埋雪期間の変化によりアオモリトドマツの開葉時期や球果生産に影響することが示された。寒温帯植生の生育特性・更新特性およびメッシュ気候値による積雪環境条件と植生分布との対応関係を検討した結果、寒温帯主要樹種の分布は積雪深の傾度に対応していることが明らかとなり、それらの樹種では実生定着のマイクロサイトが異なっていることなどが示された。積雪環境の時空間変動と各種植生タイプの分布との関係の調査では、積雪環境の変化により分布域が変化する可能性が示された。東北地方の積雪分布についてリモートセンシングによる推定をおこなった。今後、標高と積雪深の関係の係数を与えることにより、積雪分布推定の精度を向上させることができると考えられた。植生情報およびメッシュ気候値の積雪情報をもとにして、温暖化した場合にアオモリトドマツの分布がどのように変化するかを予測した例を地図として示した。以上の結果から、今後、温暖化による植生分布変化予測の精度を向上させるためには、植物の生育特性などの基礎的研究とともに、山岳域における積雪深の推定精度の向上をはかっていく必要があると考えられた。

[キーワード] 積雪環境変動、寒温帯植生、植生分布特性、リモートセンシング、影響予測地図

1. はじめに

日本の寒温帯域の多くは世界でも有数の多雪の山岳地帯となっており、この地域の植生はそうした積雪環境に適応して成立してきたものといえる。このため、温暖化による植物への影響も、積雪環境の変化を通じて大きく表れることが懸念される。山岳地域の積雪環境やそれに対する植物の生育・更新特性などについては、まだまだ不明のことが多く残されており、温暖化の影響を予測するためにも、これらの点に関して基礎的な研究を並行して進めつつ明らかにしていく必要がある。本課題では、このような条件にある寒温帯植生を対象として、積雪環境条件および植物の時間的・空間的な分布の解析を通じて温暖化による影響を明らかにし、予測地図を作成することを目的とした。具体的には、花粉分析による植生の地史的変遷過程の把握、植物の生育特性・更新特性と積雪環境条件の対応関係の把握、積雪環境の時空間変動と植生分布との関係の解析、リモートセンシングによる積雪分布の推定、これらの結果をもとにした温暖化影響予測地図の作成、という構成で研究をおこなった。

2. 積雪環境の違いからみた寒温帯植生の変遷史

温暖化による植生の変化を予測するためには、過去からの気候変動や環境の変化にともなう、どのような過程を経て植生が変わってきたかを明らかにし、現在の植生がどのような変化の方向にあるのかを理解しておく必要がある。積雪環境の変化にともなう植生変化を予測するための基礎として、ここでは積雪環境が異なる地域における植生変遷過程を調べることを目的とした。このために、多雪地の奥羽山地および、それより少雪地の北上山地の寒温帯域において土壌試料を用いた花粉分析をおこなうとともに、既存資料の結果の解析をあわせて、この地域の植生変遷の特徴を明らかにした。

(1) 研究方法

奥羽山地の秋田駒ヶ岳地域の寒温帯域において、土壌試料を採取し、土壌中に挟在するテフラ層を時間指標として用い、花粉分析をおこなった。また、既存資料の花粉分析結果ともあわせて、八幡平・秋田駒ヶ岳地域の植生の変遷過程を明らかにした。とくに表層、十和田 a テフラ (To-a) 直下 (約 1000 年前)、Ak-3 テフラ直下 (約 2500 年前) の植生の変化から、この地域の植生変遷の特徴を示した。北上山地においては、現在アオモリトドマツが分布する早池峰山と青松葉山における植生変遷過程の例を示し、八幡平・秋田駒ヶ岳地域の結果と比較した。

(2) 結果・考察

八幡平・秋田駒ヶ岳地域では、表層において多くの地点で *Abies* 花粉は 5%以上の出現率を示しており、3 地点では 20%以上を示した。しかし、現在アオモリトドマツが優占するところでも、一部には 10%に満たない地点もみられた。これに対して約 1000 年前 (To-a 直下) では、*Abies* 花粉が 10%以上の出現率を示したところはなく、八幡平地域の 3 地点において 5-10%の出現率を示したのが最も割合が大きかった。約 2500 年前 (Ak-3 直下) では、さらに *Abies* 花粉出現割合は小さく、5%以上の出現率を示すところもみられなかった (図 1)。このように、*Abies* 花粉がおおむね 1000 年前以降に増加し始めるのはこの地域全体の特徴といえる。

北上山地については、現在アオモリトドマツが生育する小田越、青松葉山の 2 地点の結果を検討した。青松葉山では To-a テフラが層として確認できず、また土壌層位ごとの大まかな分析であったために *Abies* 花粉増加の詳細な年代は明らかでないが、*Abies* 花粉が 10%以上の出現率を示

したのは最表層のみであった。小田越においても *Abies* 花粉が 10%以上の出現率を示したのは最表層のみであり、To-a テフラ層の下では 2%未満の出現率であることから、*Abies* 花粉が増加し始める年代は奥羽山地と同時代と考えられた。

北上山地における調査地点が少ないため結論を得るまでには至らなかったが、以上の結果からは、現在の多雪・少雪に関わらず、この地域では *Abies* 花粉増加の年代はほぼ同じ時代であると推察された。

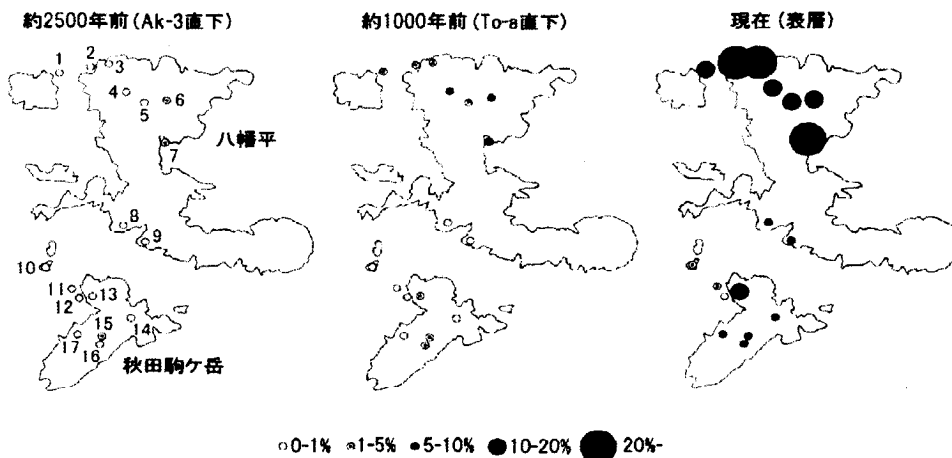


図1 八幡平・秋田駒ヶ岳地域における *Abies* 花粉出現率の変化

実線は標高 1100m の等高線

1-7,10,13,14:守田(1985), 8:守田(1996), 9:守田(1990), 11,12,15-17:池田(未発表) より描く

3. 積雪変動がアオモリトドマツの生長に及ぼす影響

長期間の積雪は温度環境を変化させることによって、植物の生長・再生産に影響を及ぼす。本州日本海側は世界有数の多雪地帯で、樹高 5m 程度の個体が埋雪することもある。長期間埋雪した個体では、埋雪しなかった個体に比べて開葉および開花・結実時期が遅れると予想される。アオモリトドマツは本州日本海側の寒温带林から森林限界付近にかけて優占する種の一つで、再生産可能な個体が埋雪することもある。積雪の変動は、埋雪する期間を変動させ、さらには生長・再生産期間を変化させて群落の動態に影響を及ぼすと予想される。このため、積雪変動が寒温带上部の植生に及ぼす影響を予測する一段階として、気温・埋雪期間がアオモリトドマツの開葉時期・球果生産に及ぼす影響を知ることを目的とした。同時に、埋雪しない個体について平均気温が 2°C 上昇した場合の開葉時期を予測した。

(1) 研究方法

気温が開葉時期に及ぼす影響については、八幡平地域・大松倉山の樹高 10m 以上の林冠構成個体について樹冠上部・当年枝を調査対象とした。2 日間隔の直接観察で開葉日を決定すると同時に、地上高 5m における気温をデータロガーによって測定した。3 年間のデータをもとに開葉に必要な有効積算温度について解析した。以上の調査は埋雪しない個体を対象にし、埋雪の影響を知るための対照データとした。

埋雪が再生産に及ぼす影響については、秋田駒ヶ岳地域・湯森山の東斜面に設置した調査区の

個体を対象とした。球果生産している個体の樹高・樹冠サイズを求める一方で、融雪期に埋雪している個体の樹高を求めた。また、樹高と球果サイズの関係について解析した。

(2) 結果・考察

①気温が開葉時期に及ぼす影響 (大松倉山)

各年における開葉日は個体間で変異があり、最も開葉が早い個体と遅い個体との差は6~9日間であった。調査地での平均開葉日はどの年においても6月29日付近であった。生長に有効な日平均気温の閾値を5℃として、1月1日からの有効積算温度を個体・年間で比較した結果、個体・年間で有意の差が検出された。

生長に有効な日平均気温の閾値を1、3、5、7、9℃として有効積算温度を算出した結果、1月1日からの有効積算温度はそれぞれ、585.2、440.6、311.2、202.4、120.2℃となり、寒温帯の針葉樹で知られている例 (例えば Hannerz 1999: *Picea abies*) よりも高い値となった (図2)。調査地の気温は5月上旬から急激に上昇し、この時期から積算した有効積算温度は急激に低下した (図2)。積雪に長期間埋もれた個体が平均開葉日の時点で不足する有効積算温度を算出した結果、生長に有効な気温の閾値が1、3℃の場合は5月初めまで埋雪した場合に有効積算温度の不足が検出された (図3)。閾値が5℃の場合は5月下旬に、7、9℃の場合は6月上旬まで埋雪した場合

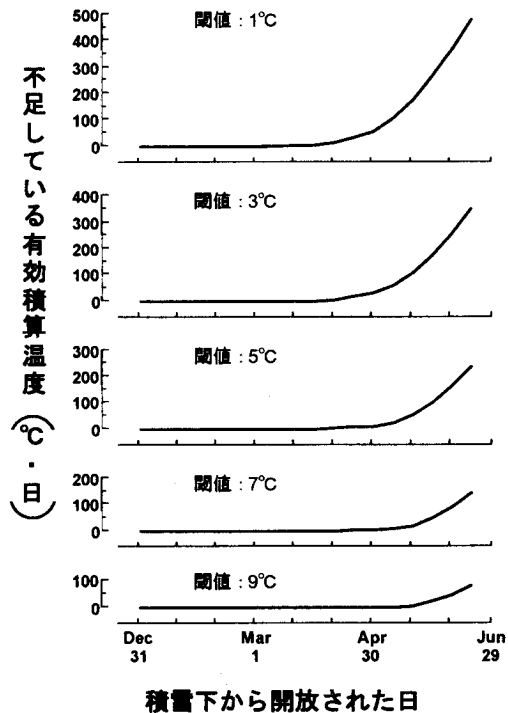
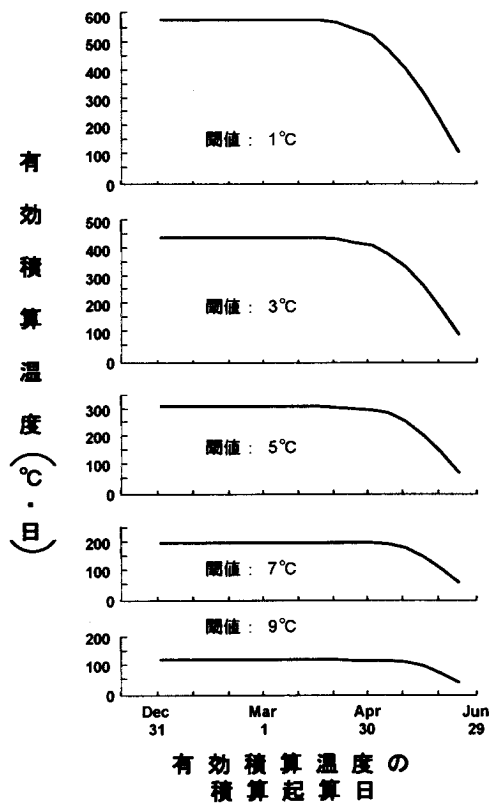


図2 生長に有効な日平均気温閾値・積算起算日が異なる場合の有効積算温度

図3 埋雪により、平均開葉日において不足している有効積算温度(1月1日から有効な温度を感受できると仮定)

に有効積算温度の不足が認められた(図3)。

開葉が有効積算温度によって決まることを仮定し、1999年から2001年までの平均気温よりも2℃上昇した場合の開葉日を予測した結果、生長に有効な気温の閾値が1~9℃の場合、開葉日は11~13日早まると予測された。

②埋雪が再生産に及ぼす影響(湯森山)

樹高と球果の有無を調べた結果、樹高3m以下の個体でも球果生産が可能であった。球果サイズは、樹高の低い個体では小形化する傾向があった。

1995年の場合、樹高の低い個体は高い個体よりも開花の遅れが確認されている。開花の遅れは球果生長開始の遅れをもたらし、球果の小形化の原因となっているのかもしれない。

埋雪した個体の積雪からの出現時期は年変動があったが、樹高5m程度の個体が春先に埋雪していることが確認された(図4)。湯森山では樹高3~5mでも球果を生産するが、雌花芽を形成した個体が積雪下から出現するのが5~6月に及んだ場合、開花が遅れると推測される。

両地点での調査結果より、積雪に埋もれる期間が5月下旬以降まで及んだ場合には、開花・開葉の遅れ、生産した球果の小形化が起こることが示唆された。また、平均気温が2℃上昇した場合、積雪に埋もれない個体では開葉日が11~13日早まることが予想された。これに対し、5月下旬まで積雪に埋もれる個体では、気温の上昇に融雪時期の早期化が加わることによって開葉日が11~13日以上早まり、積雪に埋もれない個体に近づいていく可能性がある。

4. 積雪環境のちがいが寒温带林構成樹種の更新に及ぼす影響

本州の亜高山帯針葉樹林では、太平洋側-日本海側の積雪環境傾度に沿って構成樹種のちがいがみられる。積雪の少ない太平洋側山地ではコメツガ、シラベが優勢であるが、多雪な日本海側の山地ではアオモリトドマツが優勢である。このような植生のちがいは積雪の影響下で成立していると考えられるが、その成立機構、すなわち積雪の作用のうちのどれが関与し、それに対する各樹種の特性にどのようなちがいがあるのかは解明されていない。地球温暖化の影響で積雪環境が変化する場合に亜高山帯林の樹種構成に大きな変化が生ずる可能性があり、それを予測するためには積雪環境がそれぞれの樹種に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。ここでは、亜高山帯林の構成樹種の垂直的配列パターンの類型化を行い、その分布と積雪深との関係を検討した。そして、積雪環境傾度に沿った構成樹種のちがいをもたらすメカニズムとして、とくに積雪の生理的障害による種子、実生、稚樹ステージにおける更新障害に着目し、積雪環境下におけるコメツガとアオモリトドマツの実生定着場所特性のちがいについて解析した。

(1) 研究方法

①太平洋側-日本海側の地理的傾度に沿った亜高山帯林構成樹種のちがいと積雪環境

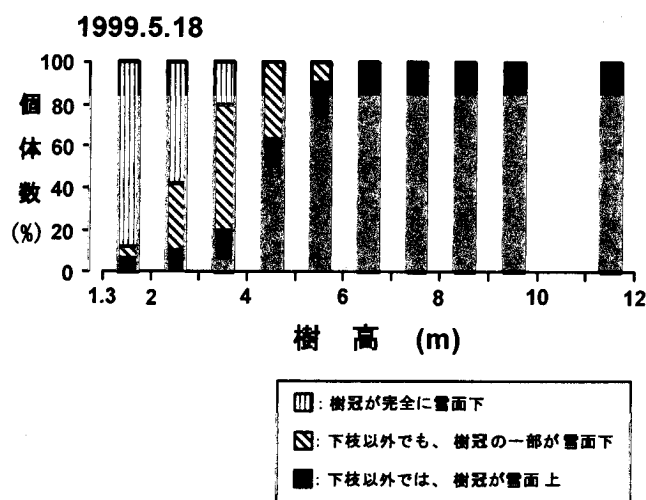


図4 春先に埋雪していた個体の各樹高階における割合(湯森山)

上越山地を中心とする山城(那須、男鹿、高原、奥日光、奥鬼怒、尾瀬、越後三山、巻機、谷川、苗場、志賀高原、万座、四阿、浅間)において 19 座の山を選び、登山ルート沿いに垂直的な植生の推移や群落の種組成、構造について観察を行った。すなわち、主要樹種の優占度を 1)ごく稀に出現するのみ、2)常在的に出現するが、優占種ではない、3)優占種である、の 3つのランクで判定し、林相が変わるたびにこの記載を行った。その資料から樹種の垂直配列パターンにもとづく山の類型化を行った。気象庁のメッシュ気候値の積雪深と温量指数のデータを用い、二万五千分の一地形図を 4 等分した区画ごとに、温量指数と積雪深の関係を直線回帰によって求め、その式により $WI=45$ の高度における積雪深を算出した。

②積雪環境下におけるコメツガとアオモリトドマツの稚樹定着場所のちがい

岩手県北上山地、早池峰山の草本・ササ型林床のコメツガ・アオモリトドマツ林に 0.1ha の調査プロットを設置し、両樹種の稚樹・成木がどのような場所に定着しているのかを判定した。定着場所は、倒木、根張り、岩礫、地表の 4つの基質に分け、地表についてはさらに林床植生の優占種によってトウゲシバ型(凹地)、オサバグサ型(凹地)、ミヤマカンスゲ型(凹地)、チシマザサ型に区分した。

③定着場所別の実生発生・消失過程の追跡

早池峰山のプロット内に種子トラップ(0.5 m²)を 25 個設置し、1998 年の充実健全種子落下量を調べた。各トラップの近くに 1~3 個の実生コドラート(地表上は 1 m²、根張り・倒木上は 0.3~0.9 m²)をさまざまなマイクロサイト上に設置し(総数 42 個)、1999 年に発芽した両樹種の芽生えを個体識別して、消失過程のセンサスを発芽翌々年秋まで行った。

(2) 結果・考察

①太平洋側—日本海側の地理的傾度に沿った垂高山帯林構成樹種のちがいと積雪環境

各山岳において優占種であると判定された高度クラスをもつ針葉樹の組み合わせによって、以下のような類型化を行った。

I 型：シラビソ、コメツガ

II 型：シラビソ、コメツガ、アオモリトドマツ

III 型：コメツガ、アオモリトドマツ

IV 型：アオモリトドマツ

I 型から IV 型への系列は、シラビソとコメツガの勢力が低下し、アオモリトドマツの勢力が増大する段階を示している。それぞれのタイプの地理分布をみると、I 型から IV 型への系列は太平洋側から日本海側への地理的位置関係とよく対応した(図 5)。この分布図に積雪深分布図を重ね合わせ、各タイプの積雪深に対する分布をみると、各タイプは重なりをもちながらも少雪から多雪への傾度に沿って I→II→III→IV の順に並んだ(図 6)。以上の結果から、コメツガとシラベの衰退とアオモリトドマツの隆盛は太平洋側から日本海側へ向かう地理的傾度に沿って生じており、それが積雪深の増加に対応していることが示された。

②積雪環境下におけるコメツガとアオモリトドマツの稚樹定着場所のちがい

コメツガの実生の定着は地表上ではほとんどみられず、それ以外の基質(倒木、根張り、岩礫)に依存していた。アオモリトドマツの実生定着はどの基質上でもみとめられたが、地表のなかでは小凸地にみられるトウゲシバ型林床に限られた。地表から30cm以上高く盛り上がった非地表基質上には、胸高直径10cm以上のアオモリトドマツはみられなかったが、コメツガでは林冠木になったものが多数みられた。このように非地表基質は、実生定着が可能で、かつアオモリトドマツとの競合を回避

できる点でコメツガにとっては重要な更新場所である。早池峰の草本・ササ型林床における針葉樹2種の実生定着マイクロサイト特性を他の山の別の林床型(少雪山地のコケ型、多雪山地の密なササ型)における既存の研究結果と比較したところ、コケ型林床ではコメツガの実生が地表にも多数みられ、また密なササ型林床ではアオモリトドマツの実生定着が倒木などに集中する傾向が報告されていることから、同一の樹種でも林床植生の状態によって定着可能なマイクロサイトにちがいが生じることが示唆された。以上のことから積雪環境傾度に沿った構成樹種のちがいの成立要因として、種子・実生期における更新阻害が重要であることが示唆された。

③定着場所別の実生発生・消失過程の追跡

健全種子落下量に対する実生発芽量の割合は、両樹種とも根張り・倒木上が地表上よりも有意に高かった。実生の生残率では、コメツガは発芽当年の8月末まではどの定着場所でも同様な値を示したが、その後は根張り・倒木上の方が地表上よりも終始高い値で推移した。とくに晩秋から積雪期にかけて両者の差が顕著となり、発芽翌年の秋までには地表上の実生はほぼ消滅した。一方アオモリトドマツは、ミヤマカンスゲ型地表で急速に減少して発芽翌年夏に消滅したのを除けば、どの定着場所でも当年秋以降の死亡率が低く、とくに積雪期の死亡はほとんどなかった。つまり、地表からのコメツガ実生の消滅は発芽翌年の秋までにはほぼ完了しており、発芽前の段階ですでに地表上の高い死亡率が示唆されている。そし

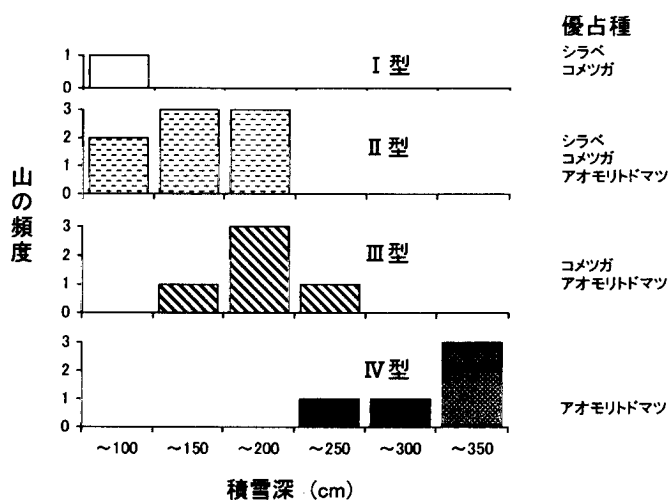


図6 樹種の垂直配列パターンによる山の種類の積雪深クラスに対する分布

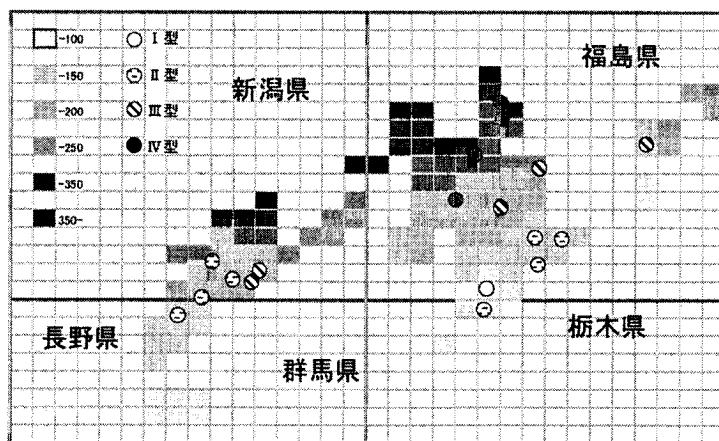


図5 上越山地を中心とする山域における積雪深(WI45 高度における)分布と亜高山帯林構成樹種垂直配列パターン類型の分布

て積雪期における死亡がその消失に大きく関与していることがわかった。

5. 積雪環境の空間・時間的変動からみた亜高山帯植生の分布特性

積雪環境が変化した場合の植生分布変化を予測するために、積雪環境の指標となる幾つかのパラメーターを用いて、東北地方の亜高山帯植生の分布特性を解析することを目的とした。ここでは、積雪深以外にも消雪日や生育期間（日数、積算温度）といった積雪が植物におよぼす“間接的な影響面”に関連したパラメーターを加味して検討した。

(1) 研究方法

解析の対象地域は、奥羽山脈・湯森山周辺の亜高山帯である。この地域を代表する風衝低木群落（ハイマツ・ツツジ科低木など）、針葉樹林（アオモリトドマツ）及び雪田群落の3つの植生タイプを選定し、積雪深や消雪日、生育期間中の地温（深さ5cm）について、約5年間定点測定を行った。

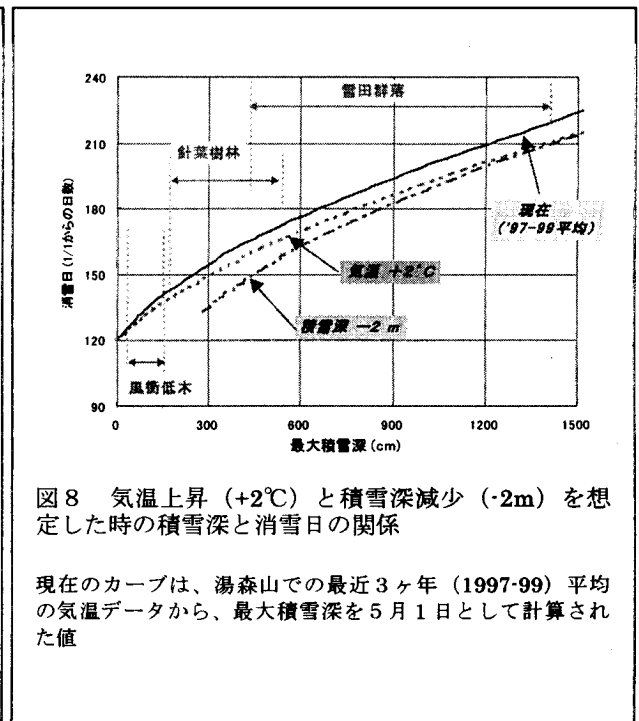
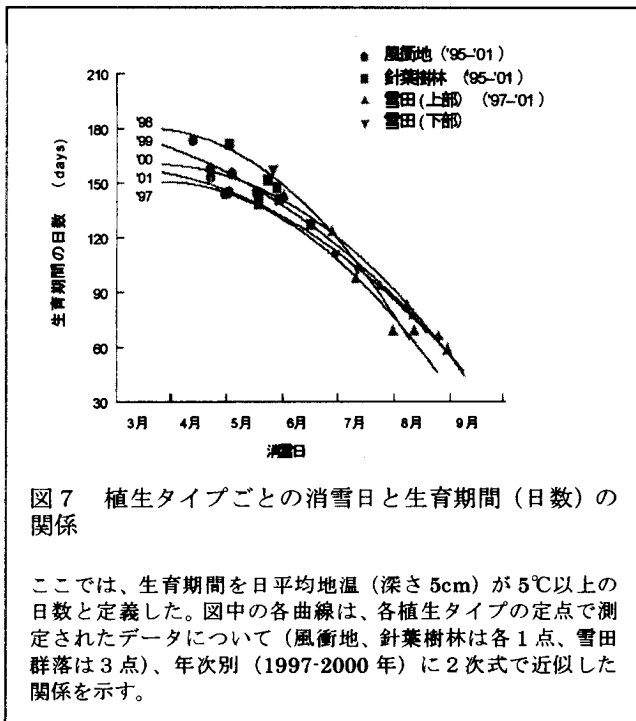
以上の実測データから、まず植生タイプ間で積雪環境の局所的、経年的な変動幅を比較した。次に、最大積雪深、消雪日、生育期間とその間の積算地温（5℃以上）の各パラメーターについて相互の関係を解析した。そして、植生タイプの分布域の重複ぐあいなど、現環境下の植生分布が積雪環境を軸にどの程度説明できるのか検討し、将来想定される気候変動シナリオ（温度上昇、降雪量減少）に沿って、各植生タイプの分布域にどのような変化が起こりうるのか予想した。

(2) 結果・考察

① 積雪深と消雪日の空間・時間的変動幅

最大積雪深は、風衝低木群落、針葉樹林、雪田群落の順で大きく、その年変動幅も、風衝群落で最も小さく（20～30 cm）、針葉樹林（2～3 m）、雪田群落（4～6 m）の順で大きかった。

消雪日は、風衝群落が一番早く、その年変動も、低木群落で最も小さく（2週間）、針葉樹林（1ヶ月）、雪田群落（1～2ヶ月）の順で大きかった。



②消雪日と生育期間の関係

消雪以降の生育期間（日数）は、風衝群落、針葉樹林、雪田群落の順で短くなった。しかし、消雪日と生育期間の負の関係には頭打ちの傾向がみられ、とくに風衝群落では雪解けの早さから期待されるほど生育期間は長くないことがわかった（図7）。また、生育期間やその間の積算温度（地温）環境で見ると、とくに針葉樹林と雪田群落の間でかなり重複しあう領域があることが示唆された。

③将来の分布域の変動予測

気温の実測データ（3ヶ年）から描いた融雪カーブにもとづき、消雪日が現在より約10日早まる条件を計算すると、温度上昇の場合は+2℃であった。一方、同様な条件は、最大積雪深の減少量では2mで達成されることがわかった（図8）。この試算から、もともと温度環境的に針葉樹林と雪田群落が重複しあうような境界領域は、わずかな積雪深の減少によって、さらに針葉樹林の成立が十分可能な領域として広がることが示唆された。以上の結果から、対象地域のような亜高山帯植生の場合、将来の気候変動に伴う積雪量の増減によって、その分布域はとくに雪田周辺部で小規模に変化すると予想された。

6. 地理的要因による積雪の時空間分布解析

気温の上昇に伴う積雪域の減少と積雪過程の変化はその地域の植生にも大きな影響を与える。これをリアルタイムで観測するために積雪量の分布推定手法の開発を目指す。

広域の積雪分布を明らかにするために、これまでは人工衛星画像と数少ない積雪観測データを頼りに、積雪と標高の線形関係を用いた推定が行われてきた。しかし、詳細な地域性や地理性は反映されておらず、高精度とはいえなかった。積雪分布では気候メッシュ値がよく利用されるが、これはある地点での積雪深を主成分分析によって地形データから推定するものであり、観測データが反映されていない。また、熱収支モデルによる積雪分布推定は日射、風速等の入力データの誤差が大きく影響し、広い地域での精度が高くなく、広域積雪深推定に問題を残していた。このため、地理情報と地域情報を NOAA/AVHRR 観測に組み合わせた精度の高い積雪分布、積雪水資源分布推定モデルの開発を目的とした。

（1）研究方法

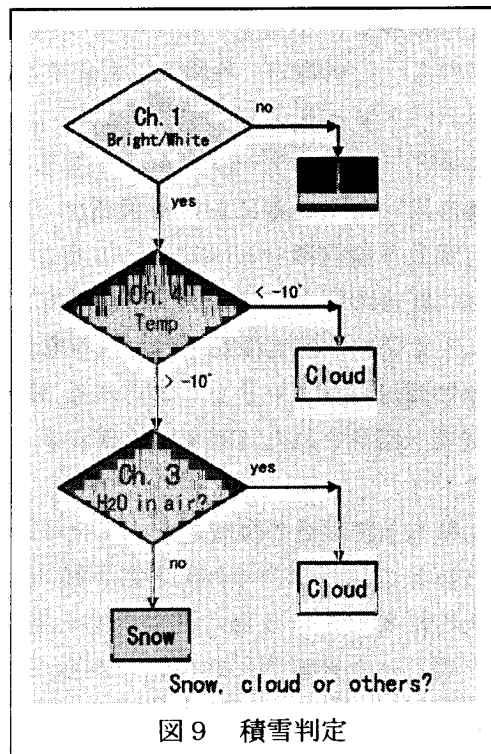
寒温帯植生が分布する東北日本を対象として、過去の NOAA 衛星データ、アメダスデータの収集を行った。また、それぞれに積雪域判定、積雪深推定を行い過去10年程度の積雪分布推定を月単位で行い、データセットを作成した。その後、各地域の積雪特性を調べ、地理情報、植生、土地利用等と比較し、積雪深の季節変化と年変化の特徴を把握した。地理情報と積雪深の関係が明らかになることで、より高精度な積雪分布推定が可能となる。積雪は温暖化の影響を最も受けると言われており、本研究の成果により得られた積雪分布の変化予測をもとにして、植生変化の予測地図作成に貢献することが期待されている。

（2）結果・考察

①積雪深分布推定

積雪深分布推定には3つの手順、1)衛星データの可視、中間赤外、熱赤外チャンネルを用いた無雪、積雪、雲域の判定、2)2週間の画像の合成による積雪マップの作成、3)AMeDASデータを用いた積雪深分布推定、で構成される。それぞれの手順は以下に示す通りである。

1)東北大学で受信、データベース化されているNOAA/AVHRRのJAIDASを用いる。このデータベースには全チャンネルのデータが用意されている。ここで用意されている多波長を用いて積雪域判定を行う。可視の波長帯によって白い部分を雪か雲と判定する。次に熱赤外を用いて温度低い領域を高層の雲と判定する。この際、国土数値情報の標高データを用いて温度補正を行う。最後に中間赤外が水粒子に強い反射を示す性質を利用して、低層の雲を判別する。雲域を除去した白い部分を積雪域としている。これらの閾値については、雲域判定については目視を中心として行い、最終的な積雪判定はAMeDAS積雪データとの比較によって得られた。(図9)



2)積雪域判定した図を2週間にわたって合成し、雲域を取り除き、雲の無い積雪分布図(積雪マップ)を作成する。これを一冬行った結果、およそ月単位で積雪マップを得ることができた。これは2週間の合成でも雲域が除去できないことが多いためである。特に冬季の日本海域と高山域は被雲率が高く、容易に積雪マップを得ることはできない。

3)積雪マップ上の積雪AMeDASから最も近い雪線位置を決めて、その地点と積雪AMeDASの標高差と積雪深の関係を対象地域全域について求め、この回帰式により雪線からの標高と積雪深の関係式(積雪深増加関数)を求める。この関数を積雪マップ上に適用することから積雪深分布の推定を行った。この回帰式に用いられるデータは2月、3月には50点以上が期待されるが、融雪期の4月には1桁の場合があり、この場合の精度には問題が残った。

②地域、地理特性に基づいた小雪、多雪年の積雪解析

積雪分布が地域特性を持つことはよく知られたことである。しかし、多くの解析が単年度に限ったものであり、この結果がその年の降雪状態によりどのように変化するかを評価する必要がある。そこで、積雪水資源(水当)量の変化パターンを地域

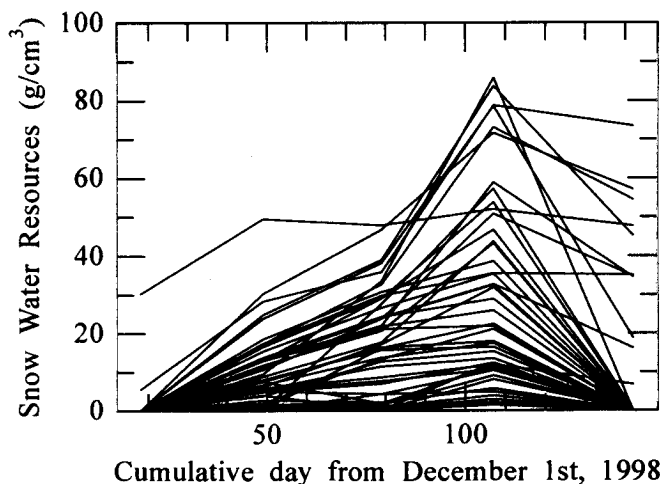


図10 3月最大積雪水資源量の時系列変化

ごとに分類し、小雪年、標準的な積雪年、多雪年の分布を比較することにより、積雪水資源分布がどのように空間的、時間的に変化するかを評価した。

③データセット

本研究で用いるデータベースとして以下のものを作成した。第1に人工衛星 NOAA/AVHRR の画像を用いて東日本における積雪マップを上の手法を用いて月1枚の割合で作成した。積雪密度推定関数を積雪深分布図に適応することにより積雪水資源量分布図を作成した。積雪密度推定関数は、既往の研究により積雪深変化により全層密度を推定する手法である。すなわち、積雪深が増加する時期、積雪深安定期、融雪期を判断し、密度を推定するものである。

対象期間は、小雪年として知られる 1990 年冬期、標準的な降雪が観測された 1998 年冬期、比較的積雪が観測された 1999 年冬期の 3 シーズンとした。対象地域は JAIDAS に含まれる東日本とした。

④積雪水資源量の経時変化パターンの分類

ほぼ月1枚の割合で作成された積雪水資源量のデータをその月の積雪水資源量の代表値とし、最大値が現われる月毎に経時変化を集める。図10は2000年冬期において3月に最大積雪水資源量が現われた地域の経時変化である。この図からほぼ一定の変化と3月に極端な最大値を記録する変化の2種類に分類することができる。同様に、他の月においてもいくつかの変化のタイプに分類することができ、結果として6種類のタイプに分類することができた。図11に分類された6種類のタイプを示す。

⑤多雪年・小雪年の積雪分布について

図12に1990年(小雪年)、1999年(標準的な積雪年)、2000年(多雪年)の各年について6種類のタイプの分布をそれぞれ示す。標準的な積雪年である1999年を中心にして考えると小雪年は積雪水資源量のピークが1月か2月に現われることが確認できる。また高山域では極端なピークが現われないアーチ型が多い。これは、小雪年では降雪期が早く終わり、それに伴い融雪期を早く迎えるからである。また、中腹域に比べ高山域では降雪量がそれほど多くないと考えられる。一方で、多雪年では多くの地域で積雪水資源量のピークが3月か4月に現われる。また、中腹部ではアーチ型である。これは、多雪年では降雪期が長く、それに伴い融雪期が始まるのが遅いからである。また、中腹域と比べて高山域の降雪量が多いと考えられる。

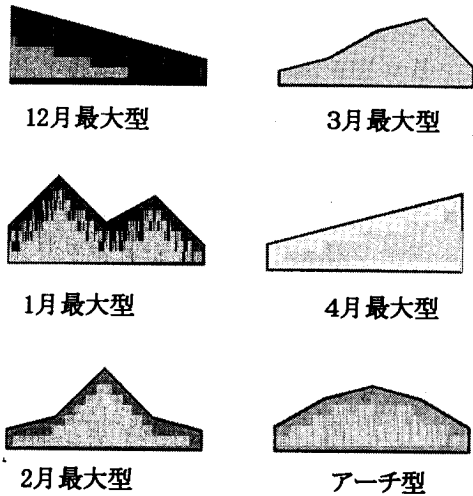


図 11 積雪水資源量の変化タイプ

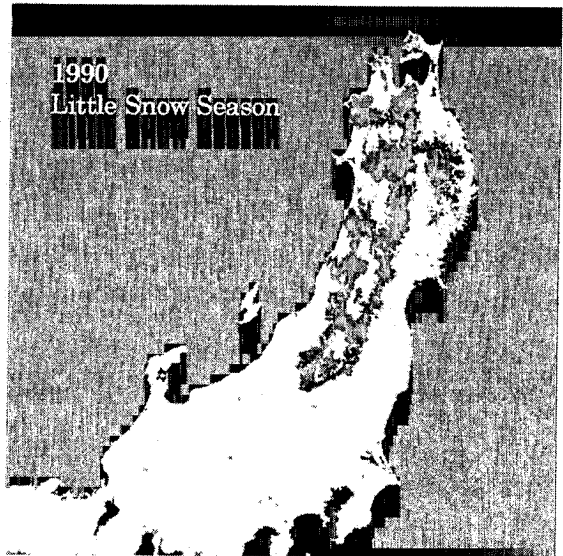


図 12 積雪区分図

7. 東北日本におけるアオモリトドマツ林の地球温暖化に対する脆弱性

—とくに積雪環境の変化について—

アオモリトドマツ (*Abies mariesii*) を主とする針葉樹林は東北日本の亜高山帯を代表する植生景観であるが、その成立条件については不明の点がきわめて多い。とくに、気温条件の上では、亜高山帯的気候下にあるにも関わらずアオモリトドマツ林が欠如する山岳が日本海側の地域を中心に多数あり、いわゆる“偽高山帯”の問題として古くから活発な議論が行われている。アオモリトドマツ林の分布が気温条件に単純に従わない原因の一つとして、斜面雪圧による分布の制限が古くから指摘されている(四手井³⁾, 1956)。実際に積雪山地では、アオモリトドマツ林は比較的緩傾斜地に集中する傾向があり(Sugita⁵⁾, 1992)、アオモリトドマツ林の分布が積雪分布によって何らかの制限を受けている可能性は高いが、その詳細については不明の点が多い。

地球温暖化がアオモリトドマツ林に与える影響を予測するには、現在のアオモリトドマツ林の成立環境を理解することが基本となる。本研究では、メッシュ気候値と 50mメッシュ地形データを元にして、アオモリトドマツ林の分布に積雪環境が与える影響を明らかにし、アオモリトドマツ林の積雪変動に対する脆弱性を評価することを目的とした。

(1) 研究方法

気候データとして気象庁によるメッシュ気候値を、植生データとして環境省による自然環境保全基礎調査データの 3 次メッシュ植生データの アオモリトドマツ林およびブナ・アオモリトドマツ林のデータを、地形データとして国土地理院による 50mメッシュ標高データを用いた。

まず、国土地理院による 50mメッシュ標高データを用いて東北地方の各 3 次メッシュの平均傾斜データを計算した。本研究で使用する 3 次メッシュ植生データ（自然環境保全基礎調査データ）は各 3 次メッシュ中心部の半径 250m の円内で優占する植生を示している。したがって、東北地方でこの円の範囲にほぼ相当する、中心部の 4x4 分の 50m 詳細メッシュについて、Smith et al.⁴⁾ (1997) の方法にしたがい 8 近傍セルを用いて傾斜を算出し、その平均値を 3 次メッシュ中心部の傾斜とした。国土地理院の 50mメッシュ標高データは、正確には緯度経度区切りのデータであるため、東西方向のメッシュサイズは 50m ではなく緯度によって大きく変化する。傾斜を算出する際には緯度毎にメッシュサイズを計算で与えてやる必要がある。本研究では 1 次メッシュの範囲（約 1/20 万地形図に相当する）毎に 3 次メッシュの東西方向のサイズを計算して与えた。メッシュサイズ計算にあたっては Bessel 地球楕円体を採用した。

このようにして作成した、3 次メッシュ傾斜データと、気候条件（積雪深および気温）、アオモリトドマツ林の分布のデータを地理情報システム（Linux 上の Grass GIS5）上で重ね合わせを行った。東北地方のアオモリトドマツ林は一部では WI が 45 以上の場所にも分布する。そこで、“東北地方の亜高山帯およびその周辺域の積雪環境を把握する” という観点から、本研究の解析対象地域は、東北地方の WI55 以下の地域とした。

メッシュ気候値から東北地方の WI を算出し、WI が 55 以下の地域について、アオモリトドマツ林の有無（植生データにおいてアオモリトドマツ林およびブナ・アオモリトドマツ林とされるメッシュをアオモリトドマツ林の分布地とみなした）、2 月の最大積雪深（メッシュ気候値より作成）、斜面傾斜について検討をおこない、アオモリトドマツ林の分布地の積雪環境を積雪深－傾斜系の環境傾度の中で把握した。

(2) 結果・考察

東北地方の WI55 以下の山地における各 3 次メッシュの 2 月の最大積雪深（以下積雪深）と傾斜を示し、その中でアオモリトドマツ林の分布地を黒丸で示した（図 13）。これによると、積雪深が大きくなるほどアオモリトドマツ林が緩傾斜の場所に集中する傾向が認められる。このことは、四手井³⁾ (1956) が指摘したように、アオモリトドマツ林分布を制約する要因として斜面雪圧が一定の効果を持っていることを意味している。

そこで、広域的な雪圧環境の推定のために、単位面積あたりの積雪グライド駆動力を推定した。積雪密度をざらめ雪の最大密度に相当する 0.5 と仮定し、積雪深と傾斜から斜面上の単位面積あたりの積雪層の重量の、斜面下方への分力をグライド駆動力と定義して、図 14 に示された積雪深・傾斜系の空間の中で図示した。これによると、アオモリトドマツ林はグライド駆動力が、0.6tonw/m² 以下の場所に集中し、0.86tonw/m² 以上の場所ではきわめてわずかししか分布しない

ことがわかる。ここで示されたグライド駆動力とは、実際の雪圧条件ではないがアオモリトドマツ林の分布と斜面雪圧との関係を考える上で有効な指標であることがわかる。また、少雪側の積雪深が1 m未満の場所にもアオモリトドマツ林の空白域が認められるが、これは、雪圧の効果というよりも、林床型などに影響する積雪期間の差が反映している可能性がある (Sugita and Tani⁶⁾, 2001)。

このように積雪分布による分布制約を受けるアオモリトドマツ林に地球温暖化はどのような影響を与えうるであろうか。現在の地球温暖化シナリオでは日本列島付近のグリッドの解像度が不十分であり、温暖化による山岳域の降雪量の変化量については十分な精度のシナリオが得られていない。山岳域では温暖化によって降雨と降雪の割合が変化するだけでなく、対馬海流や冬季モンスーンなど日本列島に降雪をもたらす大気や海流が変化して降水量そのものが変動する可能性がある。実際、過去の千年オーダーの気候変動によって日本の山地の残雪環境が大きく変化し、それには気温の変化だけでなく冬季の季節風の変動が関与した可能性が指摘されている。たとえば、Daimaru et al.¹⁾ (2002) は奥羽山脈の雪田草原土壌の変化から中世温暖期において冬季の季節風が弱まったことを指摘したが、中世温暖期の気温の変化は1℃未満と考えられており (Hughes²⁾, 1996)、1℃未満の小規模な気候変化によっても冬季季節風の変化によって、顕著な降雪量の変動が起こりうると考えられる。

そこで、本格的な気温の上昇に先行して積雪深が著しく減少した場合を想定し、東北地方の積雪深が一律に1 m減少したと仮定して、アオモリトドマツ林の分布に最適な場所の分布をみたのが図3である。ここで、アオモリトドマツの分布に適した場所とは、図2を参考にして以下の条件を満たす環境として設定した。1) 温量指数が45以下、2) 傾斜が38度未満、3) 積雪深が1 m以上、4) グライド駆動力が800kgw未満、の条件を満たす3次メッシュである。

図15によると積雪深が1 m減少することによって、北上山地や越後山地ではアオモリトドマツ林の分布適地が著しく縮小する。北上山地の降雪は冬季の季節風以外によってももたらされることが多く、温暖化によってこの地域の積雪深が減少するの点については、今後の研究を待って慎重に判断する必要がある。それでも、この地域のアオモリトドマツ林は、気温積雪の両条件で限界的な環境に近く、気候変動に対する脆弱性は著しく高いと言える。一方、飯豊山や朝日山地、月山など日本海側の山地では、積雪深が1 m減少することによってアオモリトドマツ林の分布適地がいくぶん拡大することが図15から読みとれる。しかし、アオモリトドマツ林は分布拡大の足がかりとなる群集がない場合には欠落する山地が多く (Sugita⁵⁾, 1992)、拡大速度がきわめて遅い樹種と考えられている。したがって、現在のアオモリトドマツ林の分布域から遠く離れた日本海側の山地に分布適地が拡大しても、これらの山地にアオモリトドマツ林が新たな分布を獲得することは、自然条件下ではきわめて困難であると考えられる。

図15の結果は特定の温暖化シナリオに基づくものではなく、単純な積雪深の減少を想定したもののだが、積雪深の減少によってアオモリトドマツ林の立地環境がどのような傾向を持って変動するかを示していると考えられよう。すなわち、降雪量の減少は総体としてはアオモリトドマツ林の分布を縮小する方向に影響すると予想される。

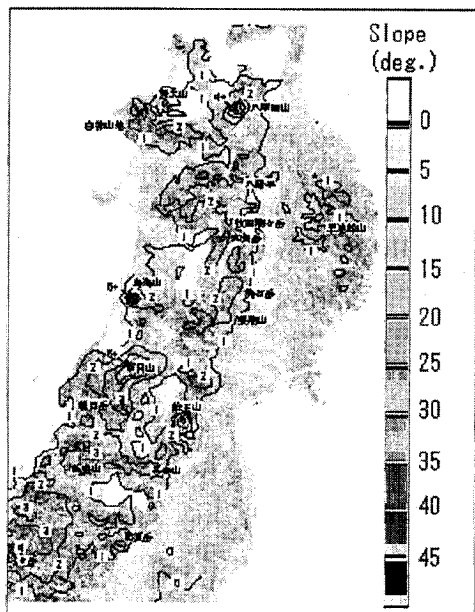


図 13 3次メッシュ中心部の傾斜と
2月の最大積雪深（等高線）

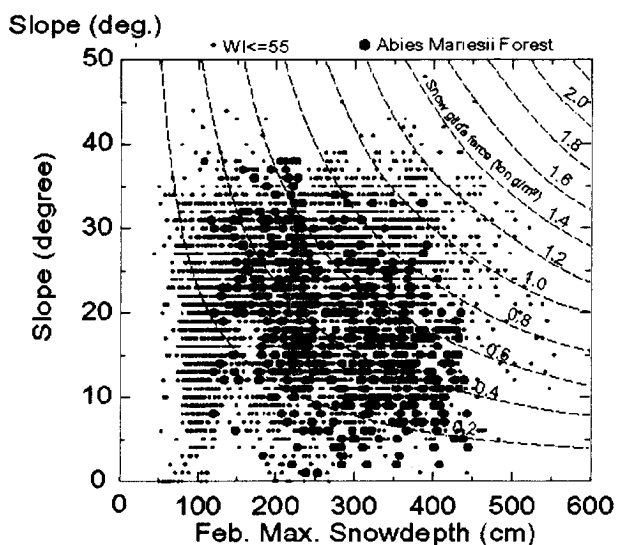


図 14 オオシラビソ林の分布と積雪深・傾斜環境

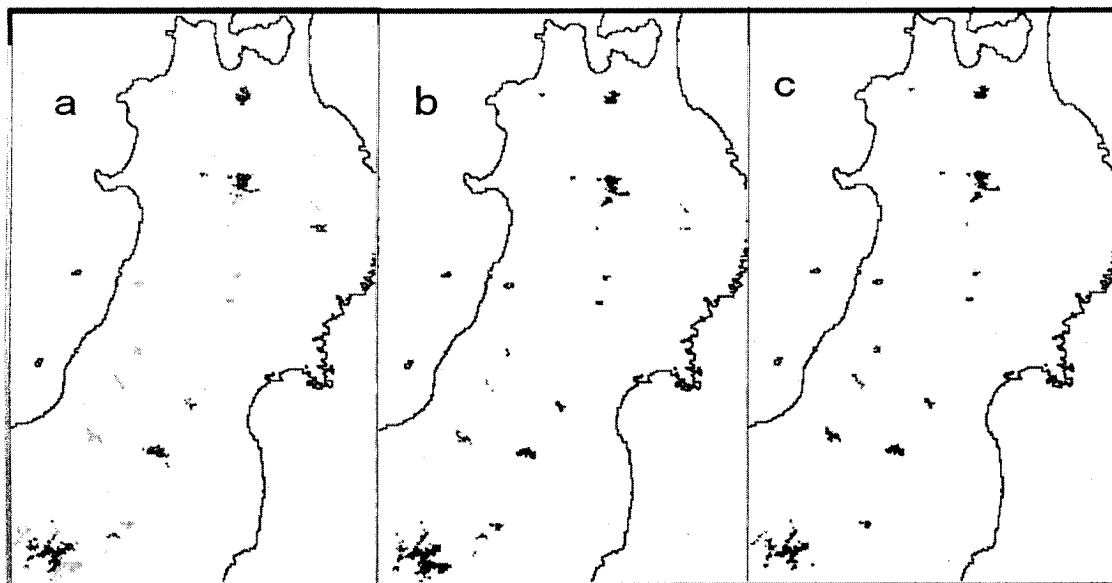


図 15 a WI45以下の地域（灰色）とオオシラビソ林の分布（黒点）
b 現在のオオシラビソ林分布可能域
c 積雪深が1m減少したときの分布可能域

8. 本研究により得られた成果

温暖化が寒温帯植生に及ぼす影響について、積雪環境条件および植物の時間的・空間的な分布の解析等を通じて調べた結果、以下のことが明らかになった。

東北地方における寒温帯の代表種であるアオモリトドマツの分布変遷について、花粉分析法を用いた解析をおこなった結果、多雪地域の奥羽山地やより少雪の北上山地のいずれにおいても、1000年前以降急速に拡大する傾向が確認され、今後の分布変化を予測する上での基礎的情報が得られた。

寒温帯植生の生育特性・更新特性およびメッシュ気候値による積雪環境条件と植生分布との対応関係を検討した結果、寒温帯主要樹種の分布は積雪深の傾度に対応していることが明らかとなり、それらの樹種では実生定着のマイクロサイトが異なっていることなどが示された。

東北地方の積雪分布についてリモートセンシングによる推定をおこなった。今後、標高と積雪深の関係の係数を与えることにより、積雪分布推定の精度を向上させることができる。

上に示した植生情報およびメッシュ気候値の積雪情報をもとにして、温暖化した場合にアオモリトドマツの分布がどのように変化するかを予測した例を地図として示すことができた。

以上の結果から、今後、温暖化による植生分布変化予測の精度を向上させていくためには、植物の生育特性などの基礎的研究とともに、山岳域における積雪深の推定精度の向上をはかることが最も重要な項目の一つであることが示された。

9. 引用文献

- 1) Daimaru, H., Ohtani, Y., Ikeda, S., Okamoto, T. and Kajimoto, T. (2002) Paleoclimatic implication of buried peat layers in a subalpine snowpatch grassland on Mt. Zarumori, northern Japan. *Catena*, 48: 53-65.
- 2) Hughes, M. K. (1996) An overview of global climate over the last 1000 years. In: Mikami, T., Matsumoto, E., Ohta, S. and Sweda, T. (Editors), *Paleoclimate and Environmental Variability in Austral-Asian Transect during the Past 2000 Years. Proceedings of 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP II Symposium*: 98-102.
- 3) 四手井綱英 (1956) : 裏日本の亜高山地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かた. *日本林学会誌*, 38 : 356-358.
- 4) Smith, C., Brown, N., Pyden N. and Wormer, D. eds. (1997) *ERDAS field guide*. ERDAS Inc. Atlanta.
- 5) Sugita, H. (1992) Ecological geography of the range of the *Abies mariesii* forest in northeast Honshu, Japan, with special reference to the physiographic condition. *Ecological Research*, 7: 119-132.
- 6) Sugita, H. and Tani, M. (2001) Difference in microhabitat-related regeneration patterns between two subalpine conifers, *Tsuga diversifolia* and *Abies mariesii*, on Mt. Hayachine, northern Honshu, Japan. *Ecological Research*, 16: 423-433.

[国際共同研究等の状況]

なし

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上发表 (学術誌・書籍)

- ①大丸裕武 (2000) 油断できない大規模雪崩. 「東北の森科学の散歩道」(森林総合研究所東北支所編), 熊谷印刷, 84-86.
- ②大丸裕武 (2000) 地球温暖化—東北の森からの警告—. 「東北の森科学の散歩道」(森林総合研究所東北支所編), 熊谷印刷, 63-65.
- ③梶本卓也 (2000) 木のからだに刻まれた雪とのたたかい. 「東北の森—科学の散歩道」(森林総研東北支所編), 熊谷印刷, 120-123.
- ④梶本卓也 (2000) 子づくりはカラスとともに. 「東北の森—科学の散歩道」(森林総研東北支所編), 熊谷印刷, 168-171.
- ⑤杉田久志 (2000) 激動の時代を生き抜く—氷期と間氷期を乗り越えて, 樹木たちの栄枯盛衰—. 「東北の森—科学の散歩道」(森林総合研究所東北支所編), 熊谷印刷, 25-28.
- ⑥大丸裕武 (2000) 1999年に八幡平で起きた全層雪崩. 東北の雪と生活, 15, 33-34.
- ⑦大丸裕武・梶本卓也・小野寺弘道・岡本 透・関 剛(2000) 八幡平の地すべり地における低頻度全層雪崩の発生実態. 雪氷, 62(5), 463-471.
- ⑧梶本卓也 (2000) ハイマツ群落の成立と立地環境. 「高山植物の自然史—お花畑の生態学—」(工藤岳編著), 北大図書刊行会, 84-98.
- ⑨杉田久志 (2000) 日本の亜高山帯針葉樹林の成りたち. プランタ 70, 10-14.
- ⑩Osawa, A., Abaimov, A. P. and Kajimoto, T. (2001) Feasibility of estimating total stem volume and aboveground biomass from measurement on the largest trees in even-aged pure stands. Canadian Journal of Forest Research, 31:2042-2048.
- ⑪杉田久志 (2001) 気候変動に伴う森林構成樹種の変遷. 森林総合研究所東北支所年報 41, 36-39.
- ⑫杉田久志 (2001) 亜高山帯林への影響. 「地球温暖化の日本への影響 2001」, 環境省地球温暖化問題検討委員会温暖化影響評価ワーキンググループ. 71-75, 122-125.
- ⑬Sugita, H. & Tani, M. (2001) Difference in microhabitat-related regeneration patterns between two subalpine conifers, *Tsuga diversifolia* and *Abies mariesii*, on Mt. Hayachine, northern Honshu, Japan. Ecological Research 16:423-433.
- ⑭大丸裕武 (2002) 世界に誇る多雪山地. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中).
- ⑮大丸裕武 (2002) 変動する雪山—雪田からみた地球環境—. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中).
- ⑯池田重人 (2002) 拡大する針葉樹林—花粉分析結果からみた森林最前線の変化—. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中).
- ⑰梶本卓也 (2002) 亜高山帯針葉樹林の更新過程と積雪攪乱イベント. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中).
- ⑱梶本卓也 (2002) 風衝地低木群落をささえる積雪環境. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中).
- ⑲関 剛 (2002) アオモリトドマツの成長とフェノロジー. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田

編著), 東海大学出版会 (印刷中)

⑳杉田久志 (2002) バラエティ豊かな植生景観. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中)

(21)杉田久志 (2002) 亜高山帯植生の背腹性とその成立機構 —多雪環境がコメツガとアオモリトドマツの実生定着に及ぼす影響—. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中)

(22)杉田久志 (2002) 偽高山帯の謎をさぐる —亜高山帯植生における背腹構造の成立史—. 「雪山の生態学」(梶本・大丸・杉田編著), 東海大学出版会 (印刷中)

(23) Daimaru, H., Ohtani, Y. Ikeda, S. Okamoto, T. and Kajimoto, T. (2002) Paleoclimatic implication of buried peat layers in a subalpine snowpatch grassland on Mt. Zarumori, northern Japan. *Catena*, 48: 53-65. (in press)

(24) Kajimoto, T., Seki, T., Ikeda, S., Daimaru, H., Okamoto, T. and Onodera, H. (2002) Effects of snowfall fluctuation on tree growth and establishment of subalpine *Abies mariesii* near upper forest-limit of Mt. Yumori, northern Japan. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 34:191-200. (in press)

(25) Kajimoto, T. (2002) Factors affecting seedling recruitment and survivorship of Japanese subalpine stone pine, *Pinus pumila*, after seed dispersal by nutcrackers. *Ecological Research* 17:481-491. (in press)

(2) 口頭発表

① 大丸裕武・斉藤武史・北田正憲(1999)北上山地の稜線部に分布する荒廃裸地の形成環境. 季刊地理学, 51, 243 (講演要旨).

②池田重人(1999) 亜高山帯に生育するスギ群落の変遷. 第46回日本生態学会大会講演要旨集, 261.

③梶本卓也(1999) ハイマツの種子散布と実生定着に影響をおよぼす要因. 第46回日本生態学会講演要旨集, 106.

④Ikeda, S., Daimaru, H., Seki, T. and Kajimoto, T. (2000) Vegetation changes in the subalpine area of Mt. Yumori in Ou Mountains, northern Japan, during the last 2000 years. *Abstracts of 10th International Palynological Congress*. 71-72.

⑤池田重人(2000) 奥羽山地湯森山周辺にみられる各種植生タイプの土壌特性の比較. 第5回東北森林科学会大会講演要旨集, 29.

⑥梶本卓也・大丸裕武・岡本透・大谷達也(2000) 八幡平周辺の亜高山帯針葉樹林の更新と雪崩発生に伴う攪乱. 第47回日本生態学会講演要旨集, 157.

⑦梶本卓也・関剛・池田重人・大丸裕武・杉田久志(2000) 奥羽山地亜高山帯におけるアオモリトドマツの成長と積雪深変動. 第111回日本林学会大会学術講演論文集, 166.

⑧関剛・大丸裕武・岡本透・池田重人・梶本卓也(2000) 多量の積雪下で引き起こされた, アオモリトドマツの枝の剥離の特徴について. 日本生態学会東北地区会報, 60, 8-9.

⑨Seki, T., Daimaru, H., Okamoto, T., Ikeda, S. and Kajimoto, T. (2000) Mechanical damages by snow on the crown of *Abies mariesii* in Mt. Yumori, northern Honshu, Japan.

Abstracts of 43rd symposium of the International Association for Vegetation Science. 125.

⑩Sugita,H. (2000) Habitat for seedling establishment of *Tsuga diversifolia* along snow gradient in Honshu, Japan. Abstracts of 43rd Symposium of the International Association for Vegetation Science, 126.

⑪Daimaru, H. (2001) Snow gliding in snowy subalpine mountains in northeastern Japan. Transactions, Japanese Geomorphological Union, 22(4), C47 (Abstracts of the fifth International Conference on Geomorphology).

⑫大丸裕武 (2001) 八幡平地域におけるパッチ状雪食地の形成過程について. 2001年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 79.

⑬大丸裕武・杉田久志・梶本卓也・関剛・埜田宏 (2001) 東北日本におけるアオモリトドマツ林の分布と雪圧環境-GISによる予察的考察-. 日本地理学会発表要旨集, 59, 186.

⑭池田重人 (2001) 秋田駒ヶ岳地域における表層土壌中の花粉組成と植生の関係. 第48回日本生態学会大会講演要旨集, 305.

⑮杉田久志 (2001) 早池峰山におけるコメツガ、アオモリトドマツの実生発生・消失過程 -実生定着マイクロサイトによるちがいを-. 第48回日本生態学会大会講演要旨集, 124.

⑯杉田久志 (2001) 上越山地を中心とする山域の亜高山帯における樹種の優占・垂直配列パターンの地理的変異. 植生学会第6回大会講演要旨集, 8.

⑰関 剛 (2002) アオモリトドマツの開葉に影響を与える温度条件. 第49回日本生態学会大会講演要旨集. 237.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし