

土地にひそむ冠雪害の リスク評価に挑む

森林総合研究所十日町試験地 勝島隆史

はじめに

樹冠に付着した雪の荷重によって、樹木の幹折れや根返りなどの冠雪害が発生します。冠雪害は、日本海側の多雪地では毎年恒常的に、太平洋側の普段雪の少ない地域では頻度は稀であるものの発生時には大きな林業被害が発生しており、林業経営の不安定性をもたらす経営上の重大なリスクとなっています。力学の視点から冠雪害の発生を評価する手法として、樹冠に作用する着雪や風によって樹幹に生じるたわみや根系の回転などの樹木の変形を、計算により評価する樹木力学モデルが提案されています（澤田 1983、Pelola et al. 1996）。この手法を発展させて、着雪量や風速、樹木の樹形や力学特性などの各データを計算に与えることが出来れば、冠雪害の発生過程を基礎として気象環境の地域性や樹木の力学的な抵抗性を反映した新しいリスク情報の創出が可能であると考えられます。

本研究は、物理モデルを用いた冠雪害のリスク評価の実施を目的とするものです。研究では、樹木への着雪現象を解明することで気象データから着雪量を予測・評価



図1 着雪モデルで考慮した着雪現象

する着雪モデルの開発を行いました。また、既存の樹木力学モデルに対して、計算に使用するデータの精緻化を図ることで、樹木力学モデルの改良を行いました。気象状況の数値計算を行うための気象モデルと、開発した着雪と樹木力学の各モデルとを連結し、冠雪害の統合的なリスク評価システムを新たに構築しました。そして、過去の長期間にわたる日本周辺領域の気象の計算結果を入力値として着雪量や樹木の変形の計算を行うことで、全国スケールの冠雪害のリスク評価を新たに試行しました。

着雪モデルの開発

着雪は、気象条件の違いによって2つの着雪型に分けられます（若浜 1988）。1つは弱風時に気温0℃付近で乾いた雪が降るときに発生する着雪です（荘田 1953）。これは主に冠雪と呼ばれるもので、乾雪型着雪とも呼ばれています。もう1つは、強風時に気温0℃以上で湿った雪が降るときに発生する着雪で（坂本ら 1978）、湿雪型着雪と呼ばれています。本研究では、着雪の野外観測や室内実験に新たに実施し、得られた結果に基づいて気象データから着雪量を予測・評価する着雪モデルの開発を行いました。

乾雪型着雪の着雪モデル

乾雪型着雪の着雪モデルの開発にあたり、スギの着雪量の野外観測を実施しました。観測は、新潟県十日町市に所在する森林総合研究所十日町試験地構内の気象観測露場において行い、森林から切り出したスギの長さ6〜7mの梢端部を用いて実際の降雪により発生する着雪量を計測しました。着雪量は、単位投影樹冠面積あたりの着雪の質量として表しました。得られた着雪量の時間変

化から降水量に対する着雪の増加量を示す着雪率と、1時間あたりの着雪の減少率を求めました。観測の結果、着雪は夜間の降雪によって大きく成長し、日中の日射や気温の上昇に伴って落下あるいは融雪して樹冠上の全ての着雪が短い時間で消失することが明らかになりました。気象状況と着雪量の変化の解析の結果、着雪率は気温0℃付近において極大となっており、0℃以下では気



観測の野外設置の様子
右) 降雪前の様子
左) 降雪後の様子

温が低いほど、0℃以上では気温が高いほど着雪率が0に近づく傾向が得られました。気温1℃以上の場合には着雪量の増加は観測されませんでした。また着雪量が大きいほど着雪率が緩やかに減少する傾向がありました。一方で減少率については、気温0℃付近で日射があるときに融雪に伴う着雪の落下が顕著であり、減少率は気温と日射量の2つの気象要素とに対して線形な関係がありました。また風速1 m/s以上のときには風による着雪や枝の揺動による落下が発生し、その減少率は風速の増加に伴い線形に増加していました。



実際の樹木への着雪の様子
左) 大雪による着雪
右) 冠風による人工的着雪

これらの結果から、気象要素を変数とする着雪率および減少率の経験式を新たに作成し、この経験式を用いて気象データから着雪量の時間変化を求め、乾雪型着雪の着雪モデルを開発しました。着雪モデルにおいて考慮した着雪現象の概念を図1に示します。また次の図2に、着雪モデルを用いて気象データから推定した着雪量の推定値と観測値の時間変化の4冬季分の比較を示します。これらの比較より、全体としては観測により得られた着雪量の時間変化を

モデルにより概ね良好に推定することに成功しました。しかし、モデルの計算結果が一部観測と一致しない期間があり、各降雪イベントにおける着雪量の最大値を正しく評価できていないことがありました。解析により得られた経験式は着雪率よりも減少率の予測精度が低い傾向にあり、特に融雪に伴う着雪の落下が生じやすい日中の減少率を正確に予測することが難しく、このことに起因して着雪量の最大値に誤差が生じたものと考えられます。

湿雪型着雪の着雪モデル

次に、湿雪型着雪の着雪モデルの開発を行いました。本研究では人工的な着雪の室内実験の結果に基づいてモデルを開発しました。実験は防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の室温0℃に調整した低温室において実施し、同研究所が所有する風洞装置および人工降雪装置を使用しました。風洞装置を用いて強風を発生させた状態で湿雪を装置内に投入し、装置内に設置したスギ枝に湿雪を衝突させることで、湿雪型の着雪現象を人工的に発生させました。これらの実験を風洞装置の風速を変えて複数回実施しました。

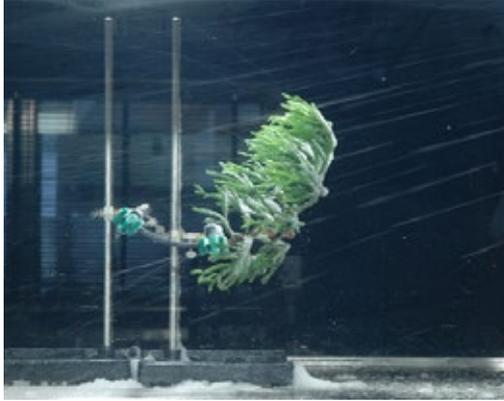
実験結果より、風速の増加に伴ってスギ枝に衝突する飛雪量が増加する傾向があるとともに、雪粒子の衝突による捕捉率は減少する傾向があることが示されました。これらの相反する二つの効果の関係によって、降水量1 mmに対する着雪量の増加量である着雪率と風速との関係は複雑な振る舞いを示していました。これら実験により明らかになった振る舞いに基づき風速に対する飛雪量と捕捉率の理論式を構築し、実験結果に対して理論式のパラメータの調整を行いました。これにより、風速と降水量から着雪量を推定するための湿雪型着雪の着雪モデル

ルを構築しました。

樹木力学モデルの開発

図3に、樹木力学モデルで考慮した着雪と風の作用による幹や根の変形と、それに対する樹木の抵抗性の関係の概念図を示します。樹木力学モデルの開発にあたっては、既往研究により提案された着雪荷重および風圧力による樹幹のたわみを解析的に求解する理論式（澤田1983）に、スギの形状や力学特性、着雪時の樹冠が持つ風に対する抗力係数などの具体的なパラメータを組み込むことで、スギの冠雪害に特化した樹木力学モデルを新たに開発しました。スギの形状の推定にあたっては、国有林内に設定した収穫試験地の樹高、胸高直径、立木密度などの林分データ（細田ら2009、2014、西園ら2019）を使用しました。着雪時の樹冠の抗力係数は、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所において風洞装置により人工的に湿雪型着雪を生じさせたスギ枝の抗力係数を計測して、風速と着雪量に対する抗力係数の関係式を新たに作成しました。

樹木力学モデルを用いて、前述の収穫試験地の各林分の各計測回のデータが持つ着雪現象に対する抵抗性の解析を行いました。乾雪型着雪および湿雪型着雪を想定した2パターンの着雪量と風速の



風洞装置を使用した湿雪型着雪の実験

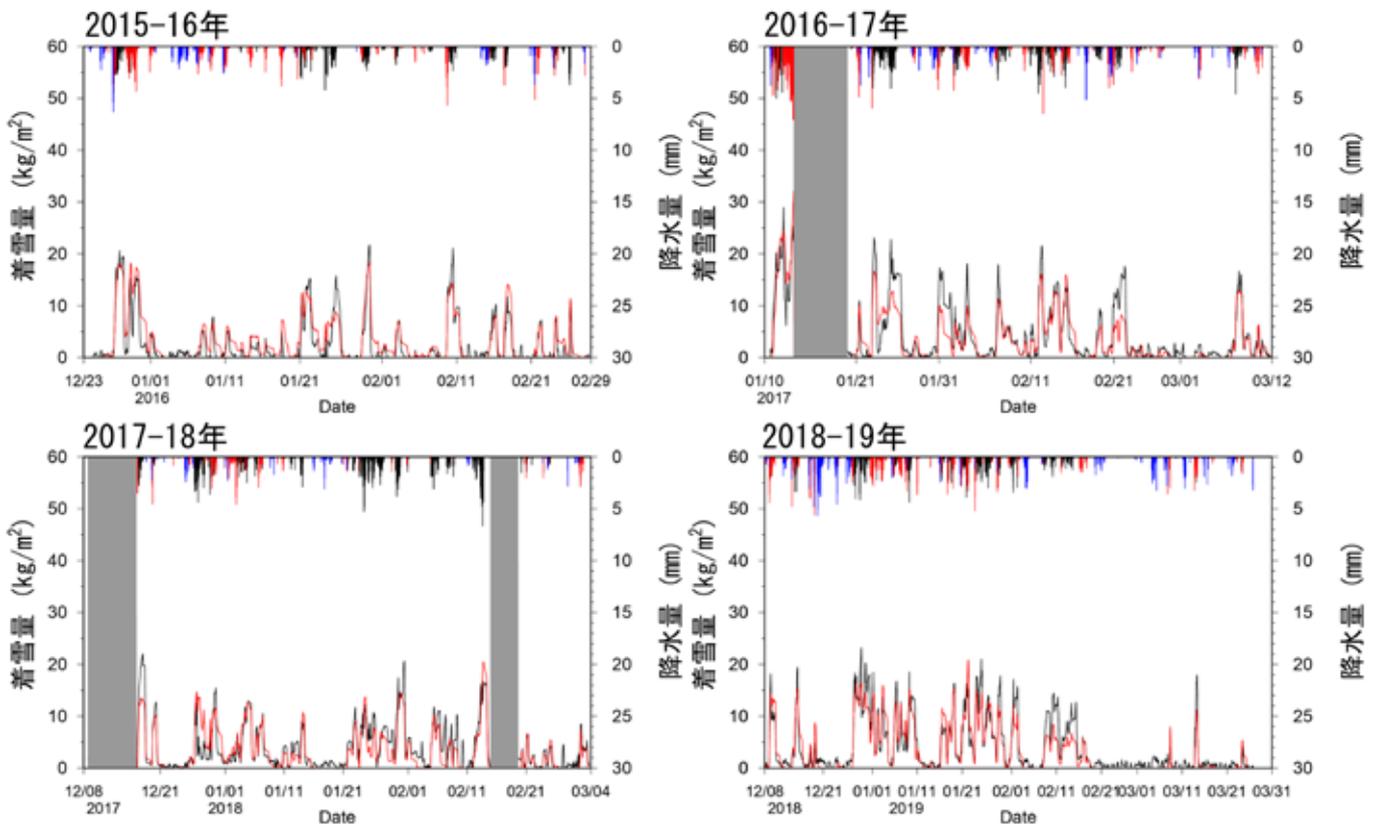


図2 野外観測による4冬期の着雪量の観測値と着雪モデルによる計算値の比較
着雪量を右軸に、降水量を左軸に示した。着雪量のうち黒線が観測値、赤線が計算値、降水量のうち黒線が乾雪、赤線が湿雪、青線が雨をそれぞれ示す。

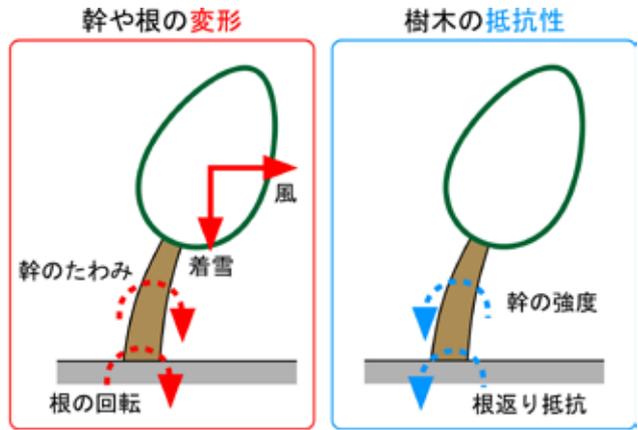


図3 着雪と風の作用による幹や根の変形と、それに対する樹木の抵抗性の概念図

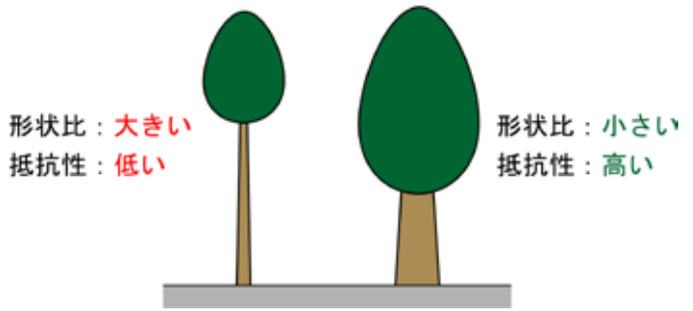


図4 樹木の形状比と、着雪に対する抵抗性の関係

組み合わせの条件において発生する樹幹のたわみおよび根系の回転モーメントを計算し、それらの樹幹の破壊強度および根系の抵抗モーメントに対する比である安全率を計算により導出しました。そして、計算に使用した林分データを母集団としたときの各林分データの安全率の平均値からの偏差を求め、これを抵抗性の指標として使用しました。解析の結果、抵抗性は樹高に対する胸高直径の比率である形状比と高い相関関係があることを確認しました(図4)。

事例検証とリスク評価の試行

開発した着雪モデルと樹木力学モデルとを連結した統合的な冠雪害のリスク評価システムを用いて、北陸地方や東北地方の太平洋側などの広い範囲において極めて甚大な被害が発生した昭和56年豪雪の被害事例を対象とし

の分布を最大値として示します。この事例は、阿武隈山地において被害が発生しており、被害時の気象状況から湿雪型着雪によるものと推定されている事例です(福島県林業試験場 1982)。計算より、被害の多かった阿武隈山地では単位投影樹冠面積あたりの着雪量が60 kg/mを超える着雪量が評価されました。また図6に、各抵抗性を仮定したときの安全率の最小値を示します。安全率は値が小さいほど危険な状態を表しており、1を下回ると理論上幹折れや根返りなどが発生する状態を表すものです。また、計算では前述の収穫試験地の全ての林分データを母集団としたときの各林分データの安全率の標準偏差 σ を指標として、 -1.0σ を抵抗性が低い林分、 0.0σ を標準的な抵抗性の林分、 $+1.0\sigma$ を抵抗性が高い林分とし、その標準偏差に相当する林分を抽出して、その林分データを力学計算に使用しました。被害林分の調査結

果から、被害を受けた木の形状比は75~105程度であったことが示されており、今回の計算では標準的な抵抗性から低い抵抗性の林分に相当します。図より、被害地周辺では抵抗性が低い林分や標準的な林分では1を下回る安全率が計算より評価されていました。この計算結果は調査結果を支持するものであり、この事例に対するモデルの有効性を示唆するものであると考えられます。最後に、リスク評価システムを用いた全国スケールでの冠雪害のリスク評価の試行を行いました。ここでは、冠雪害の発生のおそれがある安全率の閾値を1・5以下として設定した時の、冠雪害ポテンシャルの確立統計値を試算しました。計算は、3段階の抵抗性の林分に対して行いました。リスクの試算の結果、新たに開発した冠雪害リスク評価システムによる冠雪害の発生再現期間の推定値は、想定する林分の抵抗性と地域の降雪環境によって大きく変化していました。標準的な抵抗性に位置づけられる林分では、標高の高い地域を除いた国内のほとんどの地域で再現期間が50年を上回っており、冠雪害のリスクは低いことが明らかになりました。一方で、低い抵抗性に位置づけられる林分では、日本海側の広い地域、太平洋側では北海道や岩手県、福島県、これら以外の太平洋側の標高の高い地域において2年に1度の冠雪害の発生再現期間が算定されており、低い抵抗性の林分状態では日本の広い地域で高いリスクが存在することが明らかになりました。

一方で、このようにして得られた今回の試算結果の使用にあたっては、いくつか留意すべき事項が存在します。まず計算では全国を約4 kmの分解能で取り扱ったことから実際の地形を再現できておらず、地形による微気象の効果を表現できていません。また今回開発した着雪モデルでは、前述のように着雪の落下の予測の難しさに起因して着雪量の最大値を正しく予測できないことがあ

図5 昭和56年豪雪における福島県の着雪量 (kg/m²) の推定値の期間最大値。着雪量を単位樹冠投影面積あたりの質量として示した。

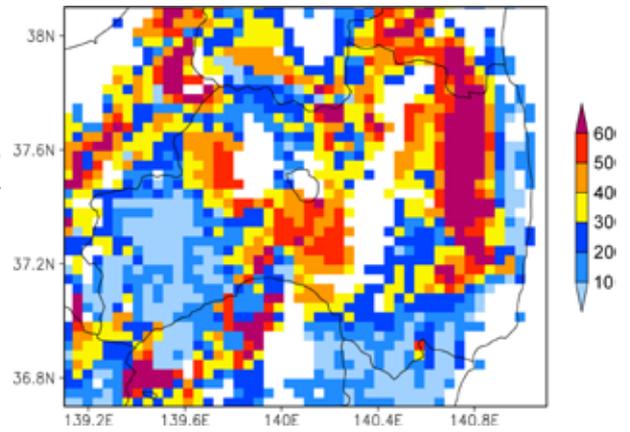
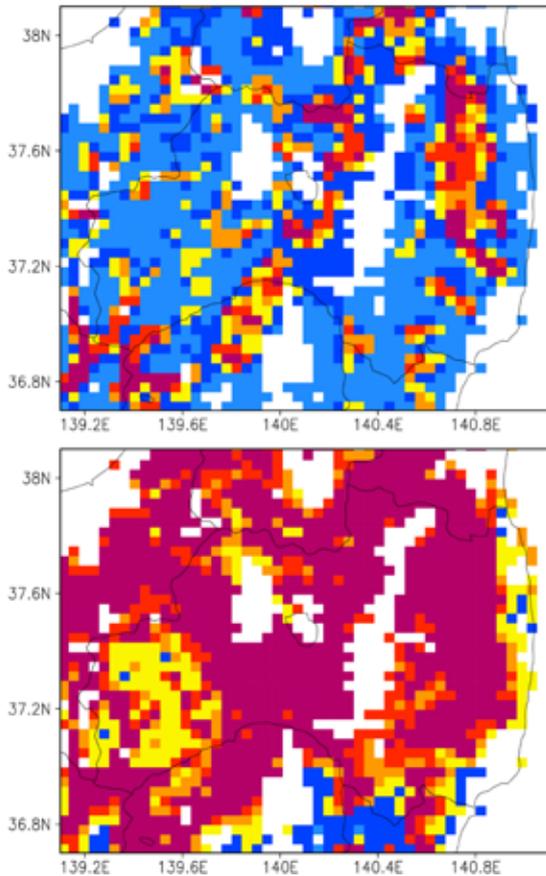
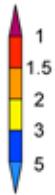
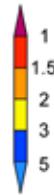
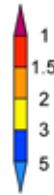


図6 昭和56年豪雪における福島県の樹木力学モデルによる安全率の期間最小値
左) 抵抗性：高い、左下) 抵抗性：低い、
右下) 抵抗性：標準



ります。さらに、力学状態の計算にあたっては全国一律の樹形を使用しており、実際に生育する木の樹形を反映していません。樹形は品種や間伐などの森林管理により大きく変化することから、実際の林分のリスクの算定にあたっては、実際の樹形のデータが計算で必要となります。そのため、リスク情報の使用にあたっては大きな不確実性を含んだ情報であることを認識して情報を使用する必要があります。

謝辞
 富山県森林研究所からスギの着雪量の計測装置の提供を受けるとともに、嘉戸昭夫氏および相浦英春氏から着雪現象および冠雪害の樹木力学についての助言を受けました。十日町地域森林組合ならびに最上広域森林組合からスギの設置、撤去の作業協力を受けました。防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所から施設使用と、実験や観測の補助を受けるとともに、湿雪型着雪の現象解明に際して同研究所安達聖特別研究員から様々な助言と協力を受けました。長期間の気象シミュレーションの実施にあたり、農林水産研究情報総合センターの科学技術計算システムを使用しました。