

スギ枝にかかる着雪量のひずみゲージを用いた計測手法の開発

古橋知季¹・勝島隆史²・熊倉俊郎¹・鈴木寛³

(1:長岡技術科学大学 2:森林総合研究所森林防災領域十日町試験地 3:森林総合研究所森林災害・被害研究拠点)

1. 研究背景

大雪により樹木への着雪が成長すると、樹木は次第に着雪の重みに耐えられなくなり、倒木する。近年では、着雪による倒木が停電や交通障害などを生じさせ、社会に混乱を起すこともしばしば見受けられる。このような着雪による倒木の発生予測には、樹木への着雪量のリアルタイムモニタリングが有効である。

これまでの計測手法は、伐採した樹木をロードセル付きの架台に設置し、樹木への着雪量を直接計測する方法(以下、従来の直接計測手法)であった。しかし、これは非常に精度の良い計測が可能である一方で、設置規模が大きく維持管理が困難であるという問題がある。

一方でひずみゲージを測定面に貼る方法は、様々な構造物や危険斜面などの監視に応用されている。このひずみゲージを樹木側面に貼るといふ簡易な手法で樹木の着雪量を測定することが出来れば、樹木を伐採することなく簡易的に着雪量のリアルタイム測定ができ、倒木の発生予測に繋がると考えられる。本研究では、このようなひずみゲージを用いたスギ枝の着雪量の計測手法の開発を試みた。

2. 計測方法

今回新たに提案する計測手法を図1に示す。ひずみゲージは、物体が外力を受けた時に発生するひずみ量を計測するセンサーであり、式(1)のように、ひずみゲージで計測したひずみ量 μ と物体の断面係数 Z およびヤング率 E の積から計測位置での曲げモーメント M を算出することができる。

$$M = \mu ZE \quad (1)$$

つまりスギ枝を片持ち梁と仮定した場合、枝への着雪の重心位置からひずみゲージまでの長さ L が既知であれば、曲げモーメント M を着雪の重心位置からひずみゲージまでの長さ L で除すことにより式(2)のように荷重量 W を求めることができる。

$$W = \frac{\mu ZE}{L} = \frac{M}{L} \quad (2)$$

しかし、枝葉への着雪の重心位置を目視で判断することは極めて困難であり、従って着雪の重心位置からひずみゲージまでの長さ L を正確に求めることはできない。

そこで枝の任意の位置の2点にひずみゲージをそれぞれ貼り付けた。これにより、各ひずみゲージのひずみ量から算出される着雪量を W_1 、 W_2 とすると、式(3)に示す連立方程式が成立する。

$$\begin{cases} W_1 = \frac{M_1}{L_1} \\ W_2 = \frac{M_2}{L_2} \end{cases} \quad (3)$$

この連立方程式より、各ひずみゲージから着雪の重心位置の長さである L_2 と L_1 について解くと、差分をとるので ΔL になり、この ΔL について連立方程式を解くと式(4)になる

$$\Delta L = \frac{M_2}{W_2} - \frac{M_1}{W_1} \quad (4)$$

また、どのひずみゲージ点から計測しても、図1.のように本来の着雪の重心位置は常に同じ位置かつ同じ荷重であるため、各ひずみゲージの着雪量 W_2 、 W_1 と、今回求めたい着雪量 W の間では常に式(5)のような等式が成り立つ。

$$W = W_2 = W_1 \quad (5)$$

以上から着雪量 W について式(4)を解くと、式(6)のようになる。

$$W = \frac{M_2 - M_1}{\Delta L} \quad (6)$$

ここで ΔL は各ひずみゲージの区間長として表される。つまり、ひずみゲージを貼り付けた時の2点の区間の長さを計測することで ΔL は既知とできる。

これにより、着雪の重心位置を求めなくても、それぞれのひずみゲージ点で計測したひずみ量 μ を式(1)に適用させ、各ひずみゲージから算出されたモーメントの差分 ΔM から着雪量 W を算出できるようにした。

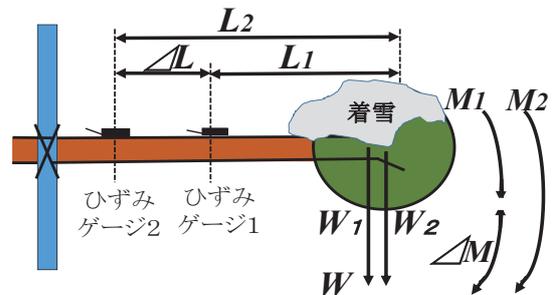


図1. ひずみゲージを用いた着雪量計測の概略

3. 検証方法

開発した計測手法の検証を森林総合研究所十日町試験地(以下, 十日町試験地)にて行った。検証では, 新潟県十日町市内のスギ林分から大きな曲がりや折れの無い通直なスギ枝を2本使用して検証を行った。

図2. のように, 実際の生育状況と同一になるようにスギ枝を自立させた単管パイプに固定し, 枝の根元付近にひずみゲージ(共和電業: 三線式リード線付き一般応力測定用ゲージ, ゲージ長5mm)を2点設置し, データロガーに接続した。

また, ひずみゲージは貼り付けが困難であるため, 図3. のように, 枝の外皮を剥き, 形成層を出した状態にしてシアノアクリレート系瞬間接着剤により直接接着した。設置した2つのひずみゲージは, 枝の軸方向と平行に, かつ各々のゲージが同一軸上に並ぶように留意して接着し, 接着後はひずみゲージが水分で濡れないように防水テープで被覆した。以上の方法で水平方向北向きに設置した枝を枝1, 南向きの枝を枝2とした。

さらに, 後述する従来の直接計測手法との単位面積あたりの着雪量の比較による検証を行うために, デジタルカメラでスギ枝を下側から撮影し, ImageJ から二値化による画像解析により垂直方向の投影面積を算出した。この方法により, 枝1の垂直方向の投影面積を0.177m², 枝2を0.276m²とした。

式(1)中のヤング率Eについては, 生育している樹木についての明確な値が存在しないため, 今回の検証に用いた枝ごとにヤング率を算出する必要がある。スギ枝からのヤング率の算出方法としては, 検証に使用する枝の枝葉部分の任意の位置にプルゲージを引っ掛け, 0Nから10Nまで2Nごとに重力方向へプルゲージを引っ張り, それぞれの荷重が働いているときの2点のひずみゲージの指示値を記録した。これにより得られたひずみ量を用いてヤング率をそれぞれ算出した。その結果, 各ひずみゲージで誤差は生じたものの, おおよそ2~4.5 GPaの値を示す結果となった。

さらに枝にかかる荷重が正しい値を示しているかを確認するため, ヤング率を求めた時と同様の方法で, 荷重試験を行った結果を図4. に示す。図4. には縦軸にひずみゲージで得られた値を基に計算した荷重を, 横軸にプルゲージで掛けた荷重を示し, ともに単位はNとした。また, 枝1をbranch1に, 枝2をbranch2として各2回, 合計で4回の荷重試験を行った結果をグラフに示している。結果としては, 4回ともほぼY=Xの線上に位置しており, この検証方法はおおむね正しい計測ができると判断した。

検証では以上のような方法を用いて, ひずみゲージを用いたスギ枝への着雪量の計測を十日町試験地の観測露場で行ったが, 実際の樹木への着雪量とも比較する必要がある。そのため, 従来の直接計測手法として, 十日町市内の林分からスギ(受冠面積5.5m²)を採取し, これも従来の直接計測手法と同じく, ロードセルの取り付けられた架台上にクレ

ーンを用いて観測露場に設置して樹木への着雪量を直接計測し, それぞれから得られた着雪量を単位受冠面積当たりの着雪の質量に換算して比較を行った。

また, ひずみ量の計測は10分間隔で計測し, 検証期間は2019年12月26日から2020年1月5日とした。

4. 結果

実際の検証装置の枝への着雪状況を図5に示す。枝が着雪によって大きく歪んでいるのがわかる。

さらに, 図6には開発した手法による着雪量の計測値を示し, 枝1を黒の実線に, 枝2を黒の点線で表示した。

さらに図7には検証期間中の十日町試験地における降水



図2. 検証装置の様子(枝2)

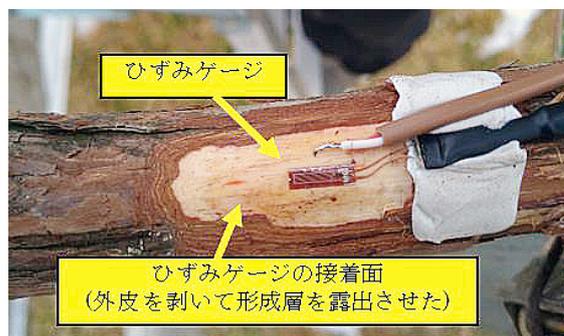


図3. 枝のひずみゲージの貼り付け状態

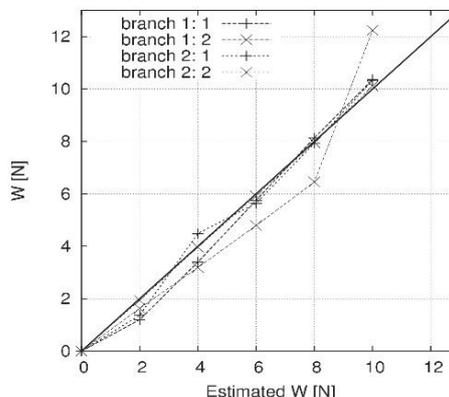


図4. プルゲージを用いた荷重試験の計測結果

量を水色の棒グラフで、風速を黒の実線で表したグラフをそれぞれ示している。

図6中には比較のため、赤線にて実森林総合研究所十日町試験地に設置した従来の直接計測法から得られた着雪量の計測結果もあわせて示す。これらの着雪量は、単位樹冠面積あたりの着雪の質量 kg m^{-2} として示した。図3に示した開発した手法と従来の手法との比較から、これらの計測値は、2019年12月26日から2020年1月5日の期間は全体を通してほぼ同じ振る舞いをしていることがわかった。

従来の直接計測手法の真値との RMSE(平均平方二乗誤差)は枝1で 1.35kg m^{-2} 、枝2で 1.29kg m^{-2} であり、今回あらたに開発した手法により概ね良好な測定結果が得られることが分かった

5. 考察

図6では2020年1月1日の午後に、枝1、枝2および真値の全ての値が 0kg m^{-2} を示している。これは図7. に示す通り1月1日のほぼ同時刻に約 3m s^{-1} の風が吹いており、これにより、枝および樹木の着雪が落下してしまったものと考えられる。

しかしながら、1月2日の夜中以降の観測値については、それぞれ差が生じていた。

これについては、2020年1月1日の深夜に一度すべて落雪した後、再び枝葉への着雪が始まったが、1月2日の夜に小康状態になった後、枝1については枝葉が着雪量に耐えきれなかったため、1月2日中という比較的短時間で枝葉から着雪が全て落下し、 0kg m^{-2} を示したものと考えられる。

しかし、枝2や従来の直接計測手法を用いたスギの木においては、一部の着雪が同じく短時間で落下したものの、全ての着雪が落下しなかった。そのため枝葉に残った着雪が1月5日にかけて徐々に融雪または落下していったために枝1、枝2および従来の直接計測手法との間に誤差が生じたものと考えられる。

本来は枝葉の着雪が認められた段階で着雪をすべて採取し、電子天秤を用いて検証装置の計測値と実際の着雪量との精度を求める必要があったが、2019年度の暖冬の影響により、解析に必要なデータ数を十分に取得することができなかったため、検証ができていない。

また、ひずみゲージを用いた着雪量の計測手法の検証が可能であると判断した時点で、十日町試験地内に生息しているスギを選定し、実際に枝へひずみゲージを貼り付けて計測をしようと考えた。これにより、検証装置と実際の樹木との計測結果の精度の検証や、樹木の上方にある他の枝との重なりなどによる計測結果への影響について検証する予定であった。

しかし、若齢段階以降のスギについては、樹木の下枝であっても地面からおおよそ2mから5mほどの位置にあるため、実際の樹木へひずみゲージを貼り付ける場合は安全対策を考慮した足場等を設営しなければならないという問題

が生じたため、検証を行うまでには至らなかった。

6. まとめ

今回新たに提案した手法は2019年から2020年にかけての十日町の事例においては、ロードセルを用いた従来の直接計測手法との比較から、検証期間を通してほぼ同じ振る舞いを示しており、概ね良好な測定結果が得られた。

しかし、本手法を実際に林分で使用するにあたり、上述したような検証が未だ不十分であり、今後とも検証を行っていく必要があると考えている。



図5. 枝2への着雪状況 (2020年2月4日撮影)

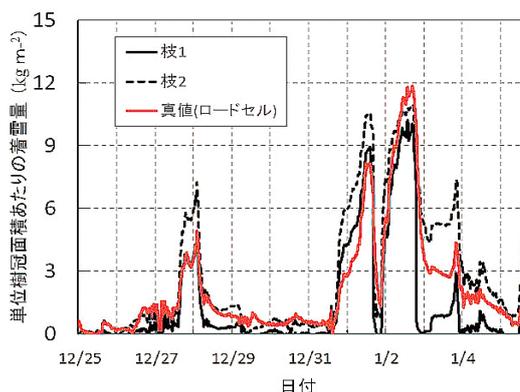


図6. スギ枝から算出した着雪量と従来の直接計測法との比較

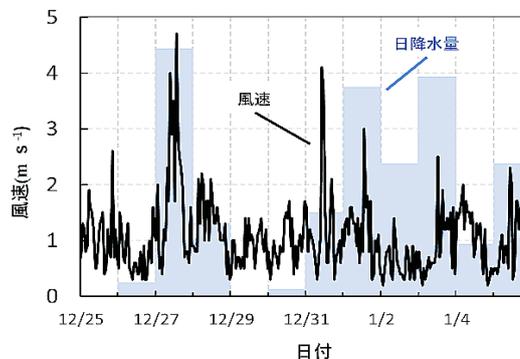


図7. 十日町試験地における風速および日降水量の観測値