

【退職記念講演】

風が吹けば、山が崩れる？ —土砂災害の誘因となる強風時の融雪メカニズムを探る—

松浦純生
京都大学防災研究所

1. はじめに

私は徳島生まれなので、小さい頃から台風や梅雨前線による土砂災害は身近な存在でした。しかし、四国では雪と関係する災害が発生することはほとんどありません。身近に雪と接するようになったのは名古屋大学農学部に入學し、ワンダーフォーゲル部員として雪山登山を始めてからです。その後、筑波大学の大学院時代にネパールで土砂災害調査を行い、地すべりに強い興味を持つようになりました。雪と地すべりが結びついたのは農林水産省に入省し、配属された林業試験場地すべり研究室で、積雪地帯の地すべり発生機構の課題を担当することになってからです。そして、防災研究所に移ってからも取り組むべき課題となりました。当初は比較的簡単に研究は進むだろうと楽観視していましたが、いざ現場での調査観測を行ってみると両者は複雑に関係し、全容の解明どころか、明らかにできたのはほんの少しだけでした。中でも、強い風が吹いたときの融雪現象と地すべり発生との関係については、多くのことが分かっていません。これは、そもそも山間地での融雪特性を正確に把握しきれていないことに原因があると考えています。このため、さまざまな仮説を立て、防災科学技術研究所と共同で室内実験を行いました。

2. 研究の背景と目的

積雪地帯では、急激な気温の上昇や降雨、さらに強風などによって多量の雪が解け、融雪洪水などの水象災害や雪崩などの雪氷災害、さらに地すべりなどの土砂災害などが発生します。最近では、平成 24(2016)年 3 月に新潟県上越市国川地区で大規模な地すべり災害が発生しました(図1)。この地すべりについては、発生前に強い風が吹き多量の融雪水が発生したことが原因と指摘されています¹⁾。気温による融雪については、観測方法が簡単で観測密度も高いことから、融雪の予測は比較的容易です。しかし、フェーンなどによる強風時の融雪については、降雨と比較して発生頻度が低いことから、その実態はもちろんのこと、メカニズムについても良く分かっていません。



図1 融雪期に発生した地すべり
(新潟県上越市板倉区国川地区)

私たちは昭和 62(1987)年の冬から、豪雪地帯の中山間地で積雪環境の観測を行ってきました。

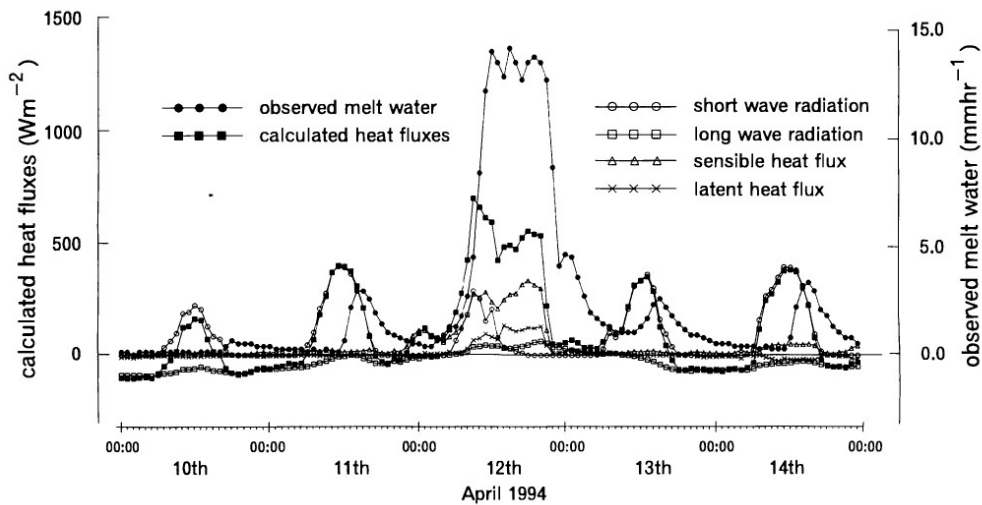


図2 強風時における地表面到達水量と計算融雪熱量²⁾

その中で、平成 6(1994)年 4 月に 10 m/s を超える強風が 11 時間以上も吹き、日雨量に換算して 180mm 近くの融雪水量を観測しました(図2)。この融雪現象につき、熱収支法を用いて融雪熱量を計算したところ、実際の観測融雪水量に相当する熱量よりも大幅に低く、強風時の融雪現象を説明することができませんでした。

この原因として、融雪に大きな影響を与えると考えられる山地斜面の粗度が原因ではないかと考え、強風時の融雪特性を解明することを目的として、風洞などを用いた融雪実験を行いました。

3. 積雪表層の凸凹効果

山地流域における強風時の融雪強度が大きくなる理由として、a) 積雪表面の凹凸、b) 山地における地形特性、さらに c) 森林などの植生状態などが考えられます。このため、風洞などを用いた室内実験を京都大学防災研究所および、防災科学技術研究所で実施しました。

積雪表層の凹凸が融雪に及ぼす影響を明らかにするため、専用の実験装置を製作し、風を吹かせることにしました。実験装置は、融雪箱(内径 42.5×30.0×22.5cm)と融雪箱を傾斜させる台座から構成されています。この装置を、室温 14℃、湿度 60%に維持した防災科研の雪氷実験棟内に設置し、横風発生装置を用いて 10m/s の風を吹かせ融雪実験を行いました。

積雪表面の形状は、ステレオカメラを用いて定期的に撮影し、表面積および比高差などを算出し

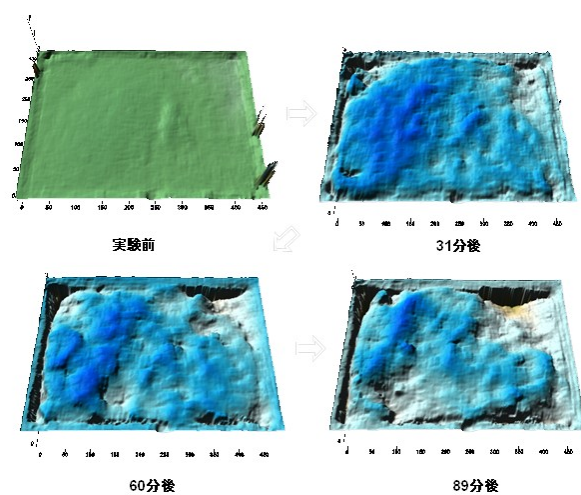


図3 融雪にともなう積雪の表面形状の変化

ました。なお、積雪表面は白色で凹凸が良く分からないことから、プロジェクターを用いてランダムパターンを照射するとともに、カメラに凹凸が明確に写るように緑色の粒子を散布しています。

実験開始後から約 90 分後までの表面形状の変化を図3に示します。なお、表面で雪が解けることによって雪面が低下するため、常に積雪面に風が当たるようにジャッキで雪を持ち上げました。これを見ると融雪実験の時間経過にともなって、積雪表層の凹凸が発達することが分かります。一方、融雪強度の変化を示したものが図4です。

実験開始後、約 30 分後には約 21mm/h の強度となり、その後 1 時間程度に渡って徐々に強度が 3mm/h 程度大きくなりましたが、その後は融雪強度が低下しました。これは、解けるべき雪そのものが減少したためと考えています。積雪表層の比高等と融雪強度の関係について解析を行いました。積雪表層の凹凸の変化が融雪強度に与える影響は、それほど大きくはないと考えています。

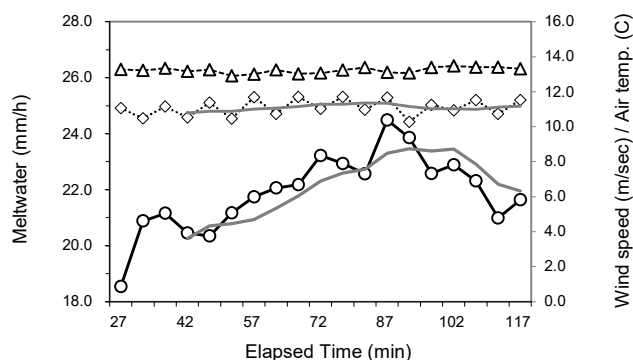


図4 融雪強度の経時変化

4. 山地斜面の地形効果

山間地の地形特性が融雪に与える影響を明らかにするため、傾斜模型を用いた室内融雪実験を、同じく防災科研の新庄雪氷環境実験所で実施しました。実験装置は凹凸の実験と同じく発泡スチロール製の融雪箱と、それを傾斜させることができる台座から構成されています。この実験装置をそれぞれ傾斜角 0° 、 15° 、 30° となるように設定し、降雪テーブル上に 3 基設置し (図5)、横風発生装置を用いて 2.5、5.0、7.5、10.0m/s の風を 1~2 時間程度吹き付け、融雪箱から流出した融雪水の重量を計測しました。



図5 融雪実験装置と横風発生装置
(防災科学技術研究所新庄雪氷環境実験所)

その結果、水平一様な雪面に対応する傾斜 0° での融雪実験では、風速 2.5m/s 程度までであれば従来のバルク係数を用いた融雪強度と同じ程度となりました。しかし、それ以上に風速が大きくなると融雪強度は非線形的に増加する結果が得られています。とくに 10.0m/s では、実験結果から求めた顕熱のバルク係数が、山間地で同じ程度の強風が吹いた

ときに得られたバルク係数とほぼ同様な値となりました。しかし、実験では周辺からの温度移流の効果が大きいと考えられるので、結果的に同じような値になった可能性が高いと解釈しています。

一方、気温や風速が同じであれば、傾斜した積雪層別に融雪強度が大きく異なることはない結果が得られました（図6）。これは、同程度の速さの風はある程度の厚さで雪面上を吹走しているため、傾斜をつけて実験しても雪面と大気との熱交換はほとんど変わらないためと考えています。

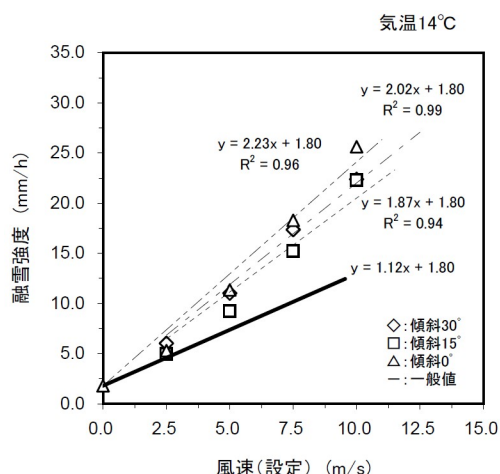


図6 傾斜ごとの風速と融雪強度の関係³⁾

5. 森林などの植生効果

山地斜面の森林が融雪特性に及ぼす影響を明らかにするため、防災研の風洞で予備実験を、防災科研の風洞で樹木を用いた融雪実験を行いました。実験条件は植被率 7.0%を基本とし（図7）、幾何学的相似を保ちつつ樹冠投影面積を減少させた植被率 1.9%と、樹木模型を配置しない植被率 0.0%の 3 パターンの実験となっています。送風口から風下に 11.0m の位置にフローティング平面ライシメータを設置し、集水範囲内で捕捉した融雪水量を実験融雪強度としました。風速は X 型の熱線風速計を用いて 1kHz で測定し、水平方向に 3 点、鉛直方向に 6 点の計 18 点で測定を行いました。

林内の大気間—積雪面の熱交換が融雪に大きな影響を与えると考えられるため、植被率 7.0%、1.9%の実験パターンの空気力学的粗度の算出には、積雪面—林内の大気間の空気力学的粗度を示した積雪面付近（積雪面上 3.0cm 程度）の風速分布（風速の弱いピーク）から空気力学的粗度の算出を行いました。その結果、各植被率における算出した空気力学的粗度を比較すると、植被率の増加に伴って空気力学的粗度が大きくなることが明らかとなりました。

さらに、植被率 7.0%と 1.9%の実験パターンを比較すると、風速は植被率 1.9%の実験パターンが大きいにも関わらず、実験融雪強度は植被率 7.0%の実験パターンが大きくなる傾向がみられます。この原因の一つとして、林内における鉛直方向の熱輸送に大きな影響を与える乱れの強さや歪度が考えられるでしょう。そこで、鉛直方向の乱れの強さと歪度について検討したところ、林内の



図7 樹木模型内への雪の充填作業
（植被率 7.0%）
（防災科学技術研究所新庄雪氷環境実験所）

熱輸送に大きな影響を与えられとされる樹冠頂付近における乱れの強さは、植被率 7.0%の実験パターンで最も大きく、次いで植被率 1.9%の実験パターンとなりました。このことから、乱れの強さの影響によって、植被率 7.0%の実験パターンでは植被率 1.9%の実験パターンよりも融雪が促進された可能性が考えられます。また、歪度は植被率 7.0%の実験パターンで大きく、特に植被率 7.0%で風速 2.0m/sの実験パターンでは他の実験パターンの約 2.0 倍程度を示しました(図8)。このことから、植被率 7.0%の実験パターンでは歪度の影響を大きく受けて融雪が促進した可能性が考えられます。つまり、樹冠頂付近で発生する乱流が林内の融雪を促進させる発端となり、この影響を受けて大きくなる歪度は融雪を加速させる効果があると考えられました。

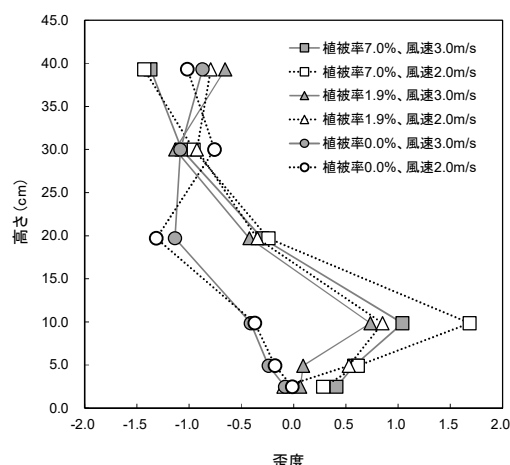


図8 各植被率における歪度の鉛直分布⁴⁾

6. まとめ

樹木模型を用いた融雪実験の結果と、雪面の凹凸および傾斜台実験の結果を比較すると、強風時には雪面状態や斜面傾斜よりも、樹木などの植生状態が融雪に及ぼす影響の方が大きいと考えられました。これは、樹木の存在によって樹冠上部から暖かい空気が林地やその周辺に取り込まれ、鉛直下向きの風が卓越し暖かい空気が雪面まで伝播されることで、雪面との熱交換が活発に行われ融雪が促進される可能性が大きくなるため、と考えられます。しかし、林内および林縁部における乱流構造や森林の群生配置、樹種や樹齢などと融雪特性の関係を明らかにするには至っていません。今後も、強風時の融雪メカニズムの解明に向け現地観測や融雪実験、さらに数値実験などを進めることで、極端気象時の災害発生リスクの予測精度を向上させる必要があるでしょう。

参考文献

- 1) 堀尾昌宏(2012):新潟県上越市板倉区国川地内で発生した地すべりの概要、日本地すべり学会誌、49(5)、52-55.
- 2) 松浦純生、竹内美次、浅野志穂、落合博貴(1996):強風時における山地斜面の融雪特性、水文・水資源学会誌、9(1)、48-56.
- 3) 萩村俊司、松浦純生、平島寛行、阿部 修、上石 勲、千木良雅弘(2014):模型斜面を用いた強風時の融雪実験、日本雪工学会誌、30(2)、1-6.
- 4) 中町 聡、松浦純生、平島寛行、阿部 修、阿部和時(2017):樹木模型を用いた予備的な融雪実験、日本雪工学会誌、33(3)、10-15.