

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：23303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14824

研究課題名(和文) 観測が困難な場所における積雪観測手法の構築：見落とされていた積雪融雪過程の解明

研究課題名(英文) Development of new snow observation methods in severe climatic and topographic conditions: elucidation of snow melting processes

研究代表者

藤原 洋一 (FUJIHARA, Yoichi)

石川県立大学・生物資源環境学部・准教授

研究者番号：10414038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：観測が極めて難しい場所において積雪・融雪を観測できる新たな方法を開発し、山岳域や森林内といった観測事例の乏しい地点での積雪・融雪観測を行った。まず、小型温度ロガーを利用した雪温プロファイル計測による積雪深観測を行い、同法の実用性を向上させた。また、音響を利用して降水形態を判別することのできる装置の開発も試みた。さらに、森林内の積雪深変動を多地点において観測し、積雪深と地形特性(標高、斜面方位)および森林特性(開空度)との関係について調べることによって、重要であるにも関わらず見落とされてきた積雪融雪過程の解明を試みた。

研究成果の概要(英文)：Methods to observe snow accumulation and melting are developed for use in places where snow observation data are difficult to collect, for example, in mountainous and forested areas where few observation studies have been performed. First, the snow temperature profile method is used using small temperature loggers, and improvements are made for increasing the method's practicality. Moreover, a new device is developed to judge the precipitation phase (rain or snow) using sound. Finally, snow depth is measured at numerous points in a forested area, and the relation between snow depth, topographic conditions (elevation and slope direction), and forest conditions (canopy) is investigated.

研究分野：水文学 水資源学

キーワード：積雪 融雪 森林 山岳 気候変動 観測 水資源 モデル

1. 研究開始当初の背景

気候モデルの出力を利用して積雪・融雪モデルを駆動する温暖化影響評価は数多く行われているが、使用される積雪・融雪モデルは標高があまり高くなく、また、森林のないオープンスペースのデータによって検証されている場合が大半である。そのため、標高の高い地点や森林内における積雪・融雪モデルの性能は分かっておらず、流域末端における流量の再現性のみでモデルが構築されている。そこで、観測が極めて難しい場所において積雪・融雪を観測できる方法を開発し、こうした観測事例の乏しい地点での積雪・融雪観測によって、既存の積雪・融雪モデルの検証を行い、さらに、見落とされている積雪・融雪過程を指摘して積雪・融雪モデルの新展開を提示することは重要な課題である。

2. 研究の目的

(1) 厳しい気象環境下においても信頼ある積雪観測を行うことができる頑健なシステムや、多地点の観測をすることが可能な安価な観測システムを開発し、山岳域や森林内における積雪資料を蓄積する必要がある。石田(2006)、Lundquist and Lott(2008)は、地表面温度を測定することによって積雪期間を推定できることを提案している。さらに、大原(2008)、野口ら(2010)は高さごとに温度計測を行うことによって積雪深を経時的に測定できる方法(感温式積雪深計)を提案しているが、積雪の有無の客観的な判定方法、小型温度データロガー(温度ロガー)を設置するポールの条件といった実用上の諸問題に関する検討は不十分である。そこで、本研究では、温度ロガーを利用した雪温プロファイル計測による積雪深観測を2年にわたって行い、同法を適用する際における実用上の諸問題について詳細に検討した。

(2) 森林帯における積雪状況を正確に把握することは、流域内包蔵水量の推定、融雪出水の予測などにおいて非常に重要であるが、山岳域における積雪観測には大きな苦勞が伴う。最近では、航空レーザー測量を用いた積雪観測も試みられているが、航空レーザー測量は費用が高い、また、観測を行ったある1シーンの状況しか理解できないといった問題もある。そこで、本研究では、安価で頑健な積雪観測手法(大原, 2008; 藤原ら, 2015)を利用して、森林内の積雪深変動を多地点において観測した。さらに、観測した積雪深と地形特性(標高、斜面方位)および森林特性(開空度)との関係について調べた。

(3) 積雪・融雪モデルにおいて、降水形態(雨や雪等)の判別は重要である。従来では降水形態の自動判別には、温度や誘電率、粒径・落下速度が指標として用いられてきた。しかし、いずれの指標を用いた場合も問題があることから、安価で導入することが可能で

あり、降水形態の判別精度が高く、降雪に対して速やかに作動する判別装置を開発することが重要な課題となっている。

降水形態によって音に差異があることは、感覚的に理解することができる。また、雨と雪はそれぞれ、特異的な音響特性をもつことが示されている(岩瀬 1997; 上田ほか 2010)。これらのことから、音響特性に基づいて雨と雪を客観的に判別することの可能性が推察される。さらに、現在では安価な IC レコーダーが普及している。もし音に基づいて降水形態を自動的に判別する装置を開発することができれば、従来の判別装置よりも安価に増産することができ、融雪装置の増設等に貢献することができるかもしれない。そこで、本研究は、このような融雪装置の開発を念頭において、音響を利用して降水形態を判別する方法を開発することを試みた。

3. 研究の方法

(1) 小型温度データロガーとして、KN ラボラトリーズのサーモクロン G タイプを利用した。この小型温度データロガーをポールの地上 0cm、20cm、・・・、200cm の 11 点に取り付け、2 時間間隔で温度計測を行った。すなわち、1 日に 12 個の温度データが得られることになる。積雪判定には、2 時間間隔で測定した 1 日 12 個の温度データの標準偏差を求め、これが閾値以下の場合に積雪と判定する方法を採用した。なお、標準偏差の閾値には、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 の 5 種類について検討することとした。次に、この積雪判定結果に基づいて、積雪深を推定することを考える。ここでは、高さ $H(1) \sim H(i)$ が積雪ありと判定、 $H(i+1) \sim$ が積雪なしと判定された場合において、雪中と判断された小型温度データロガーの 1 つ上の高さ $H(i+1)$ を推定積雪深とする方法を採用した。

検証実験には石川県農林総合研究センター・林業試験場の気象観測露場を利用した。実測の積雪深は、超音波積雪深計(キャンベル社・SR50A)によって 1 時間間隔で観測し、小型温度ロガーによる積雪深推定値と比較した。なお、評価指標には、相関係数、RMSE (Root Mean Square Error)、Bias を利用した。

(2) 石川県農林総合研究センター内に約 800×400 m のエリアを設定し、この中に 21 地点の積雪観測地点を設けた。スギ人工林が 7 割程度を占め、残りはカラマツ人工林、広葉樹となっている。各観測地点には小型温度データロガーを活用した積雪深計を設置し、藤原ら(2015)の方法によって日単位の積雪深を観測した。次いで、積雪と地形特性との関係を調べるために、地形変数として標高、斜面方位を抽出した。斜面方位には、北向きか南向きかを表す指標である Northing を利用し、真北を示すと 1、真南を示すと 0 となる。また、数値標高データには、5 m 解像度

の基盤地図情報を使用した。さらに、積雪・融雪のプロセスは、地形特性だけでなく森林特性にも影響を及ぼされる。そこで、本研究では林冠の隙間を百分率で表す樹冠開空度を利用した。森林内 21 地点の観測地点において、デジタルカメラ (Coolpix950)、魚眼レンズ (FC-E8) を利用して観測地点の全天写真を撮影した。撮影した写真から解析ソフト (CanopOn2) を用いて、天頂角 25 度の範囲の開空度をそれぞれの地点において求めた。そして、21 観測地点の日積雪深と変数(標高、斜面方位、開空度)との相関係数を日ごとに算出した。さらに、同じく 21 観測地点の日積雪深データを利用して、積雪深を目的変数、標高、斜面方位、開空度を説明変数とした重回帰式を適用し、それぞれの偏回帰係数も日ごとに計算した。

(3) 降水形態(あられ、雪、雨)ごとの衝突音を記録するため、(国立研究開発法人)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雪氷防災実験棟(山形県新庄市)で実験を行った。実験に先立ち、ICレコーダー(SD-901、オリンパス株式会社)を付けた空き缶(ブリキ製、縦 22cm×横 22cmの正方形、高さ 6~8cm、モロゾフ株式会社)を実験室の床の上に設置した。ICレコーダーは、録音モード:MP3 形式(256kbps)、40~17000Hz に設定した。空き缶の裏側にはヒーター(サミコン 230SR 100-150V、坂口電熱株式会社)を付け、缶の上に落ちたあられと雪が速やかに溶けるようにした。

実験に使用するために 5 タイプの粒(あられ、雪 2 種類(A・B)、水滴 2 種類(小・大))を作成した。あられと雪は雪氷防災実験棟の装置で人工的に作成されたものを使用した。あられは粒径 4mm 以上、雪 A タイプは結晶形で粒径 0.5~5mm、雪 B タイプは球形で粒径約 0.025mm である(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 2015)。水滴は注射器を使用して作成し、針なしで作成したものを水滴大、針ありで作成したものを水滴小とした。ICレコーダーで録音しながら、高さ 3m の位置から空き缶の中央に向けて、あられ、雪 A、雪 B、水滴大、水滴小を順に落下させた。あられは一粒ずつ、合計 50 粒を落下させた。雪 A・B はいずれもスプーン一杯ずつ、合計 20 杯を落下させた。水滴大・水滴小は注射器を使用して 1 滴ずつ、それぞれ合計 50 粒を落下させた。以上の落下作業を 3 セット繰り返した。

各シグナルデータの特徴量を算出した。seewave パッケージの specprop 関数を使用し、14 個の特徴量を算出した。特徴量は、周波数スペクトラムの平均値、標準偏差、標準誤差、中央値、優占的な周波数、第一四分位数、第三四分位数、四分位範囲、重心(centroid)、歪度、尖度、平坦さ(spectral flatness measure)、エントロピー、精密周波数(frequency precision)である(Sueur et al.

2016)。次に、特徴量に基づいて粒タイプを予測するためのアルゴリズムを作成した。まず、シグナルデータを無作為に二つに分けた。一つはアルゴリズムを作成するためのシグナルデータ(同定期間)として使用し、もう一方は、作成されたアルゴリズムの精度を検証するためのシグナルデータ(検証期間)として使用した。

同定期間のシグナルデータを使って、粒タイプを予測するアルゴリズムを作成した。アルゴリズムとして、サポートベクターマシン、決定木、ランダムフォレストの三つの解析を使用した。いずれも機械学習を行って予測モデルを構築するアルゴリズムである。サポートベクターマシンは、各データとの最短距離が最大となる超平面を作成し、データを分割する。決定木は、データを属性値テストに基づいて部分集合に分割し、樹状構造で表記する。ランダムフォレストは、ブートストラップサンプルを行って関連の低い決定木を多数作成し、集団・機械学習を行う。検証期間のシグナルデータを使って、各アルゴリズムの予測精度を求めた。また、同定期間を用いた場合の予測精度も確認した。

4. 研究成果

(1) 小型温度データロガーによる推定積雪深と実測値を比較したところ、閾値に関しては、標準偏差 0.1~0.5 を利用した結果が良好であるが、差はわずかではあるが 0.3 が最も良い結果であった。超音波式積雪深計による実測値と小型温度ロガーによる推定値を時系列で比較した結果を図 1 に示す。なお、この場合における相関係数は 0.865、RMSE は 14.3cm、Bias は -2.24cm であった。これを見ると、とくに系統的な誤差などは見られず、再現性は極めてよいことが分かる。本研究で利用した小型温度データロガーは、1 個 2,000 円程度であり、11 個設置しても 2 万円強という価格であるから、超音波式積雪深計と比べるとはるかに安価である。また、本実験においても機器の破損は一切なく、観測中におけるメンテナンスも全く必要としなかったことから、本研究の目的であった安価で頑健な積雪観測手法が構築できたといえよう。

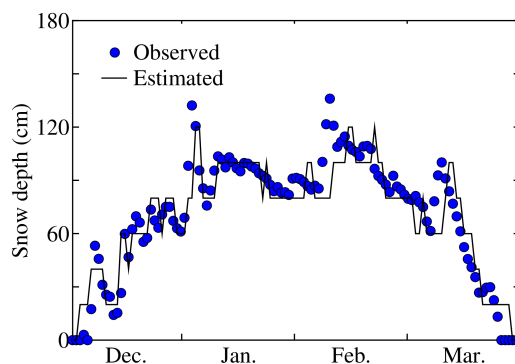


図 1 実測と推定積雪深の比較

(2) 全 21 地点の観測積雪深と地形・森林特性(地点の標高、斜面方位(Northing)、開空度)との相関係数を日ごとに求めた結果を示す(図2)。また、気象露場において観測した積雪深を最上段に示している。これを見ると、12月~1月の堆積期においては、標高と積雪深の相関係数が最も大きい。2月上旬からの融雪期においては斜面方位、開空度と積雪深の相関も強くなっていることが分かる。

次に、全 21 地点において観測した積雪深を図3に示す。ここで、オープン(開空度:100%、Northing:0.27、標高:219 m)で観測した結果を青四角、森林内(開空度:52%、Northing:0.21、標高 243 m)で観測した結果を赤丸で示している。また、他の森林内で観測した結果を細実線で示している。これを見ると、2 地点を除くとオープンの方が森林内よりも積雪が遅くまで残っていることが分かる。また、積雪深の増加量を比較することで降雪の樹冠遮断率を求めたところ、降雪の樹冠遮断率は約 21%となり、降水の遮断率およそ 11%(小倉、未発表)と比較すると大きいことが分かった。

積雪深が減少している 3 時期に着目して、積雪深の減少速度を求めた。3 月は森林内の方がオープンよりも積雪深の減少速度が遅く、これは日射が森林によって遮られるためと理解できる。一方、1 月は森林内の積雪の減少速度が 2.4 cm/day、オープンの減少速度は 1.6 cm/day となっており、森林内の減少速度の方が早くなっている。これは、樹体からの長波放射の影響と考えられるが、今後より詳細な観測が必要である。

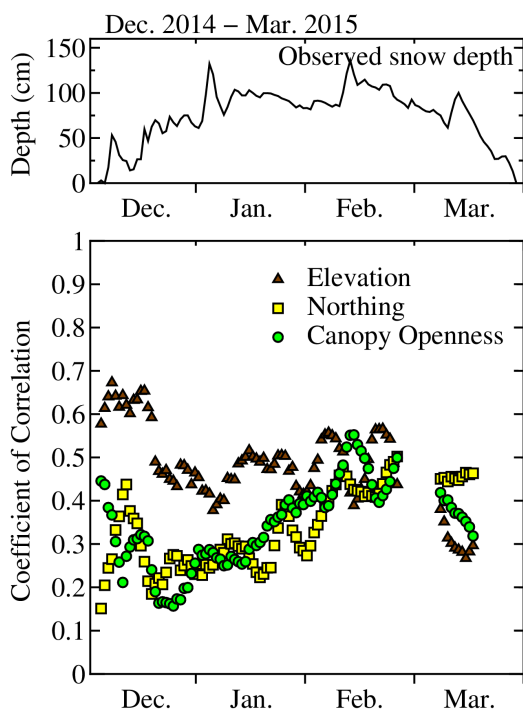


図2 積雪深との相関係数

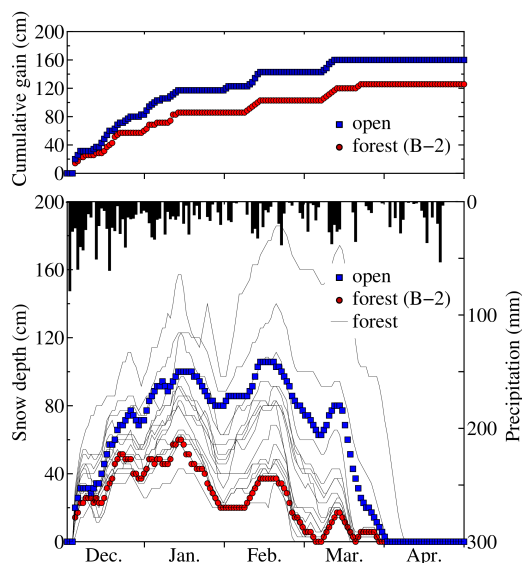


図3 積雪深の変化

(3) アルゴリズムの予測精度の検証結果を行った。検証期間を用いた場合の予測精度はサポートベクターマシンが 54.6%、決定木が 61.4%、ランダムフォレストが 68.2%であった。また、予測精度と 95%信頼区間ともに、ランダムフォレストが最も高かった。これらの結果から、本研究で用いたアルゴリズムの中ではランダムフォレストが最も優れていたことが示された。決定木分析の結果、粒タイプを判別するのに有効な特徴量として、周波数スペクトラムの中央値と標準偏差、平均値、四分位範囲が選択された。このうち、中央値と標準偏差は統計的に有意であった(中央値: $P < 0.01$ 、標準偏差: $P < 0.05$)。この結果は、中央値と標準偏差が粒タイプ(降水形態)を判別する予測因子として適していることを示唆している。

野外では降水の衝突音は、降水量や音源からの距離、積雪量、地表面の材質、風の強さ等によって変化する。今後、本研究の成果を基にして、野外で有効なアルゴリズムの開発を進める必要がある。また、音響特性に基づいて降雨量を推定する手法が開発されており(細川・藤波 2012)、本研究で開発したアルゴリズムについても、さらに改良することで粒タイプの判別と同時に降水量を推定することが可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7件)

- 藤原洋一・川口渉・長野峻介・田中健二・一恩英二・渡辺一生: UAV と SfM (Structure from Motion) による高精度な 3 次元地形モデルの作成方法に関する検討、農業農村工学会誌、Vol. 86, No. 3, pp.207-210, 2018
- 田中健二・瀬川学・藤原洋一・高瀬恵次・丸山利輔・長野峻介: 高濃度濁水が下流扇状地の水田浸透量・河川伏流量に及ぼす影響 手取川流域の大規模土砂崩壊を事例として、農業農村工学会論文集、No. 306, pp.1_47-1_54, 2018

田中健二・瀬川学・藤原洋一・高瀬恵次・丸山利輔・長野峻介：土砂崩壊に伴う高濃度濁水が手取川扇状地水田の地下水涵養機能に与える影響、水文・水資源学会誌、Vol.30、No.3、pp.173-180、2017

Yoichi Fujihara, Keiji Takase, Shunsuke Chono, Eiji Ichion, Akira Ogura, and Kenji Tanaka: Influence of topography and forest characteristics on snow distributions in a forested catchment, Journal of Hydrology, 546, 289-298, 2017

藤原洋一・両角圭祐・高瀬恵次・百瀬年彦・長野峻介・一恩英二：竹林拡大が土壤物理性および積雪・融雪に及ぼす影響、農業農村工学会論文集、No.303、pp.11_87-11_94、2016

高瀬恵次・小倉晃・藤原洋一・丸山利輔：積雪深の再現を目的としたモデルの構築と検証、水文・水資源学会誌、Vol.29、No.2、pp.107-115、2016

藤原洋一・高瀬恵次・小倉 晃・一恩英二・長野俊介：雪温プロファイル計測による積雪深観測手法の実用的適用法に関する検討、農業農村工学会論文集、No.300、pp.1_207-1_213、2015

[学会発表](計 19件)

藤原洋一：音響を利用して雨と雪を判別しながら降水量を計測できる装置の開発、第22回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業報告会、新潟、2018年3月14日

高瀬恵次・藤原洋一：山岳地流域における面積雨量の推定、第30回水文・水環境研究部会シンポジウム、大阪、2017年12月1日

藤原洋一：音響を利用した雨雪判別手法の構築～IoT(Internet of Things)への適用に向けて～、平成29年度石川県立大学シーズ発表会、野々市、2017年9月20日

藤原洋一・長井貴広・中野光議・高瀬恵次・田中健二・Jessica D. Lundquist：林内の積雪とオープンスペースの積雪はどちらが遅くまで残るか？水文・水資源学会2017年度研究発表会、北見、2017年9月19日

藤原洋一・高瀬恵次・長野峻介・一恩英二・小倉 晃・田中健二：暖地積雪地帯の森林内における多地点積雪深観測について、平成29年度農業農村工学会大会講演会、藤沢、2017年8月29日

藤原洋一：森林内や高標高地帯における積雪観測 石川県手取川流域を対象として 大気環境学会中部支部講演会、金沢市、2017年6月4日

伊藤優子・岡本透・浅井和由・藤原洋一・高瀬恵次：Effects of transboundary air pollution on water chemistry around the source area of Hakusan-Tedori River、JpGU-AGU Joint Meeting 2017、千葉市、

2017年5月20日

佐藤嘉展・佐藤貴弘・高瀬恵次・藤原洋一：手取川流域における積雪分布の季節変化の推定、水文・水資源学会2016年度研究発表会、福島、2016年9月15日

藤原洋一・高瀬恵次・長野峻介・一恩英二・田中健二：地形および植生が森林内の積雪・融雪に及ぼす影響について、水文・水資源学会2016年度研究発表会、福島、2016年9月15日

藤原洋一・両角圭祐・高瀬恵次・百瀬年彦・長野峻介・一恩英二：竹林拡大が積雪融雪および土壤物理性に及ぼす影響について、平成28年度農業農村工学会大会講演会、仙台、2016年8月31日

両角圭祐・藤原洋一・百瀬年彦：竹林拡大が積雪・融雪および土壤物理性に及ぼす影響、2015IPU セミナー、金沢、2016年3月4日

藤原洋一・長井貴広：雨雪判別に関する基礎的研究について、2015IPU セミナー、金沢、2016年3月4日

両角圭祐・藤原洋一・高瀬恵次・長野峻介・一恩英二：竹林拡大が積雪融雪および土壤物理性に及ぼす影響、2015年度日本農業気象学会北陸支部大会、富山、2015年11月28日

谷内伸輔・藤原洋一・佐藤嘉展・高瀬恵次・長野峻介・一恩英二：衛星データを利用した積雪域の年々変動解析、2015年度日本農業気象学会北陸支部大会、富山、2015年11月28日

藤原洋一・高瀬恵次・一恩英二・長野峻介・小倉晃：森林内における多地点積雪観測：小型温度データロガーを活用して、水文・水資源学会2015年度研究発表会、東京、2015年9月10日

Yoichi Fujihara, Keiji Takase, Akira Ogura, Eiichi Ichion, Shunsuke Chono, and Yoshinobu Sato: Spatiotemporal distribution of snow depths in forest areas in Japan, 2015 Joint Seminar on Environmental Ecology and Restoration between Taiwan and Japan, Taichung, 11 August 2015

Yoshinobu Sato, Nobuhiro Ebisu, Yoichi Fujihara, Keiji Takase, Akira Ogura: Spatio-temporal estimation of snow in a mountainous region using a time-lapse camera network and unmanned aerial vehicles (UAVs), IUGG2015, Prague, 24 June 2015

Yoichi Fujihara, Keiji Takase, Akira Ogura, Eiichi Ichion, Shunsuke Chono, Yoshinobu Sato: Estimating the spatial-temporal distribution of snow depth in a forest catchment, IUGG2015, Prague, 24 June 2015

藤原洋一：森と水 - 森林がもつ緑のダム機能 -、平成27年度公開講座「森林と人

生き物とのかかわり」、野々市、2015年5月29日

〔図書〕(計 1件)

藤原洋一:人が近づけない場所の雪の秘密を探る、石川県立大学自然まるかじり編集委員会(編)、石川の自然まるかじり、pp.8-13、東海大学出版部、2016

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<http://water.ishikawa-pu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原 洋一 (FUJIHARA, Yoichi)
石川県立大学・生物資源環境学部・准教授
研究者番号: 10414038

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()