

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23710211

研究課題名(和文)積雪物性値の気候依存性に関する研究

研究課題名(英文)Dependence of snow physical properties on climatic conditions

研究代表者

山口 悟(Yamaguchi, Satoru)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号：70425510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：積雪の物性値の時空間変化は、大気の循環にも影響を与える非常に重要な問題である。しかし気候・気象モデル内では、積雪物性値は一様とされる事も稀ではない。本研究は、全層平均密度()並びに全層平均熱伝導率(C)の値並びにその空間分布が日本において時期によりどのように変化するかを求めた。その結果同じ場所でも時期によって とCの値が異なること、同時期でも場所によって とCが異なること、分布の様子も時期によって異なることを明らかにした。本研究の結果は、大気と積雪との熱のやりとりを考える際に、積雪の物性値を気候モデルや気象モデル内で一様の定数とするのは非現実的であることを示している。

研究成果の概要(英文)：Seasonal snow cover is one of the most extensive cryospheric phenomena, exerting significant climatic impacts not only in the high-latitude/ high-altitude regions but also in the mid-latitudes. However, large-scale climate models such as global climate models (GCM), Earth System Models (ESM), or regional climate models (RCMs) on regional scales usually treat snow physical properties (e.g. density, thermal conductivity) to be independent of spatiotemporal fluctuation. In this study, spatiotemporal fluctuations of snow physical properties in Japan were estimated. The results demonstrate the spatiotemporal fluctuations of snow physical properties, and the dependence of the spatial distribution of snow physical properties on time. This study implies the problem to treat snow physical properties constantly in the GCM, ESM, RCMs models.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 自然災害科学

キーワード：積雪 物理特性 積雪物理モデル 気候依存性

1. 研究開始当初の背景

(1) 季節積雪の存在は、最も広域に及び寒冷圏現象の一つであり、その気候的影響は高緯度・高標高域のみならず、中緯度地域においても重要である。季節積雪が存在する地域では、積雪期間中の大気と地表面との熱のやり取りは、積雪を通じて行われる。したがって積雪の物性値(熱伝導率や密度等)の時間変化は、積雪と大気との間の熱のやり取りに影響を与え、最終的に大気の循環にも影響を与える非常に重要な問題である。近年温暖化の影響で北半球の積雪面積は減少しているという報告がなされている(たとえば Rikiishi, 2004)が、積雪の物理的特性の面的分布が面積変化に伴いどのように変化しているかを議論された例はない。一方、近年温暖化予測などに使われている大循環モデル内では、その積雪の物性値は非常に粗く取り扱われており、例えば、密度や熱伝導率が全球また全積雪期間を通して一様とされる事も稀ではない。しかし、先に述べたように季節積雪が存在する期間、大気と地表面の熱のやり取りは積雪を通じて行われたために、気候変動に伴う積雪の物理的特性の変化をきちんと把握、気候モデルに取り込まなければ、将来予測において大きな予測の不確かさを生むことになる。

(2) もっと狭い領域、短い時間(数時間から数日先)の気象状況の計算を行う地域気象モデルにおいても、積雪の物性値は地域依存性及び季節を問わず一定で取り扱うのが一般的である。しかし日本の日本海側などを考えた場合、海岸線から脊梁山脈にかけての数十kmの間に、積雪がない状態から6m以上に急激に変化することも珍しくなく、また雪質も多種多様である。実際に低温実験において、たとえ同じ密度の雪でも雪質が変わると熱伝導率が変化するという報告(山口ほか, 2010)もあり、大気と積雪との熱のやり取りを考える際に、積雪の物性値をモデル内で一様の定数とするのは現実的ではないと予想される。しかしそれらのモデルにおける積雪の物理的物性値の取扱い方の妥当性に関して定量的な議論はされてこなかった。

2. 研究の目的

本研究は“積雪の物性値の時間的・空間的变化と気候との関係”とを明らかにするために様々な気候下の積雪地帯(多様な雪質、海岸部～豪雪地帯)があり、かつ高空間分解能で気象観測(AMeDAS等)を行っている日本をモデル研究対象地域と定め、1)様々な気候域で積雪物性値の測定を行い、両者の関係を明らかにするとともに、2)積雪物理モデルと既存の気象データとを組み合わせた数値計算により、平地だけではなく山地における広域積雪物性値分布の計算を行うという観測・モデルの両方からのアプローチをとることにする。またそのために野外で客観的に積雪物性値を測定できる手法の開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では、研究期間内に効率よく成果を挙げるために、積雪と大気との相互作用を考える際に重要な物性値(熱伝導率や密度)の気候依存性を明らかにする。そのためには

- さまざまな積雪条件化における積雪の熱伝導率と密度の時系列データ取得のための観測網の整備
- 気象庁等が公開している気候値を入力データを用いた積雪物理モデル計算スキームの開発

の二つを行うものとする。

a)に関しては、防災科学技術研究所(以後、防災科研)が新潟県長岡市と山形県新庄市で20年近く行っている詳細な積雪断面観測データに加え、他の研究所が公開している積雪断面観測データを利用することにより、多様な気候下の積雪に関する積雪物性の時系列変化データを得る。また防災科研が全国の山地に設置している“積雪気象ネットワーク(SW-Net)(Yamaguchi et al., 2011)”に雪温センサーを追加することで、山岳域の積雪の熱伝導率の時間変化をモニタリングする。

b)に関しては、現在防災科研が雪崩発生予測のために開発を行っている積雪物理モデル(SNOWPACK(Hirasima et al., 2010))の計算スキームを基に改良を行う。その結果を踏まえ、必要であればSNOWPACKの改良に必要な実験を行いつつ、気象モデルに還元できる精度を持ちうる積雪の物性値の時間的・空間的变化を求める。なお気象庁のAMeDAS等のデータがあまりない標高の高い地域には、AMeDASデータに加えSW-Netの気象データを使用することにより、雪国の大部分を占める山岳気候地帯にも上記の結果を展開する。

4. 研究成果

(1) SNOWPACKの性能評価

平地における積雪物理モデル(SNOWPACK)の精度評価に関しては、山形県新庄市、新潟県長岡市、新潟県十日町市の2008/2009、2009/2010、2010/2011の3冬期のデータを用いて、積雪内部の水の移動の計算を改良したSNOWPACK(Yamaguchi et al., 2010; 2012, Hirashima et al., 2010)で計算を行い、積雪変質モデルの結果と断面観測との比較を行った(平島・山口, 2012)。

その結果、積雪内部の水の移動も含めてモデルの結果は実際の観測をよく再現していることがわかった。また上記3つの国内の観測点に加え、アラスカの2点(フェアバンクス、パロー)において、モデルの計算結果と実測との比較を行った(Saito et al., 2012)。その結果、気候帯が異なってもSNOWPACKは、比較的精度よく積雪の物性値を再現することがわかった(図1)。このことは、SNOWPACKを用いて面的に積雪物理量を計算する妥当性を示すものである。

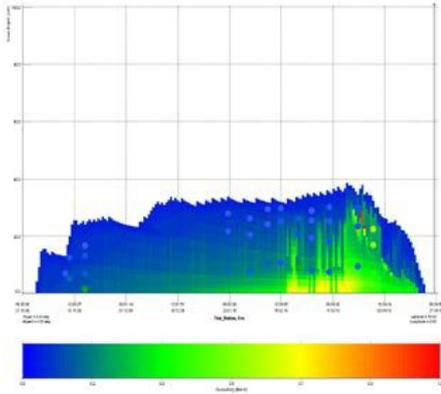


図1 フェアバンクス(2009/2010)における熱伝導率のモデルの結果と実測との比較
カラーは熱伝導率の大きさを示す。ドットは現地実測された値
(Saito et al., 2012 より引用)

(2) SNOWPACK の改良に向けた実験

積雪の圧縮粘性係数(η_c)は、密度変化やクリープ現象など積雪の基本的振る舞いにかかわる重要な変数である。一般的に η_c は、雪温と密度の関数として表されている(前野・黒田, 1986)。しかし近年標高の高いところに存在する氷河で掘削されたアイスコーを用いた古環境復元や、火星の氷床の流動やその成り立ちなどの研究など、従来の雪氷学の想定外の条件下(常気圧以外の圧力場)における積雪の現象に関する研究も進んできている。また日本の高山域のような平地よりも気圧が低い場所に存在する積雪を考える上でも、常気圧下で求められた η_c をそのまま使用してよいか疑問が残る。しかしそのような常気圧下でない条件における η_c に関する研究はこれまであまり行われていなかった。そこで本研究では、 η_c が気圧の変化によっても変化しうるのであるのかを実験的に明らかにすることを試みた。

図2は気圧別の η_c と密度(ρ)の関係を示している。図2の結果は η_c と ρ の関係には明らかに気圧依存性があること、すなわち同密度において η_c の値は気圧が低いほど小さい、言い換えれば雪が圧縮されやすいということを示している。

今回の実験の範囲の密度における圧密過程では、雪粒子の再配列が支配的であると考えられる。したがって、気圧が小さいほうが η_c が大きくなる理由としては、以下のメカニズムが考えられる。

1. 常気圧下に比べて、低圧下のほうが雪粒子の昇華が促進。
2. その結果、低圧下の雪粒子のほうが早く球形に近い形状となる。
3. 樹枝状の雪粒子よりも球形の雪粒子のほうが再配列がしやすいため再配列が進み、その結果低圧下の圧密が促進された。

本実験結果で示された η_c の気圧依存性は高山域で取得されたコアの解析などに重要になってくるだけではなく、標高の高い山岳域などで発生する雪崩の予測などにも重要になってくる可能性がある(山口ほか, 2011; 2013)。

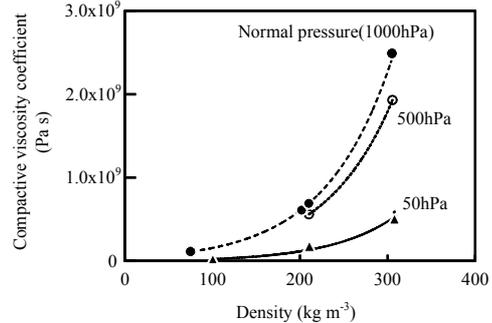


図2 圧縮粘性係数(η_c)と密度(ρ)との関係

図中の線は、指数近似
(山口ほか, 2013 より引用)

(3) 積雪の物理特性を客観的に測定する手法の開発

自然積雪は複雑な3次元のネットワーク構造を持っている。しかし従来の断面観測の測定方法だと必ずしもその特徴を反映している物理量が得られている訳ではない。比表面積(SSA)は、粉体などの多孔質物質の組織構造を表す物理量の一つで、単位質量もしくは単位体積当たりの粉体粒子の表面積のことである。従って雪粒子のサイズだけではなく、形状や結合状態も反映した物理量である。

従来日本における積雪の SSA の測定方法としては、片薄片を用いた方法が主流であったが、その制作には時間がかかり、定期的な野外観測で行うのは困難であった。近年野外で簡単に SSA を測定する手法として、近赤外領域の反射率を測る方法(NIR 法)が提案されている(Matzi and Schneebeli, 2006)。しかしその手法は乾いた雪の測定結果を基に開発されたものである。そこで NIR 法を日本の濡れ雪地帯で適用可能かどうかに関して試験を行い、改良点を明らかにした(Yamaguchi et al., 2014)。これにより、従来の断面観測と比べより客観的に積雪物性値の測定が可能となった。

(4) 気温別降水分布の年々変動について

積雪の物性値を計算する際に、当初は平年値を入力データとして、計算を行うことを考えていた。しかし平年値を入力データとすると、本州の日本海側においては、積雪構造をうまく再現しないという結果が得られた。その原因を解明するために、新潟県にある気象庁の観測所(26 地点)における過去 19 冬期(12 - 2 月)の 1 時間ごとの気象データを使い、降水時の気温別に冬期降水量のうちどれくら

いの割合の降水が生じているかを求めた(以後、気温別降水分布)。

図3に、1996/1997冬期における長岡の気温別降水分布を示す。長岡では、0 付近に降水量のピーク(T_s)が存在するのがわかる。これはこの地方において冬期降水の多くが冬型に伴う寒気の吹き出し(0 付近まで気温が下がった時)の際に生じるということを示している。一方、平年値を用いてしまうと、寒気の吹き出しのようなイベントが再現されないために、降雪量が再現されないということがわかった。

その後、気温別降水分布に関してさらに詳しい解析を行った結果、新潟県では T_s の年々変動が小さい地点と大きい地点があること、 T_s の年々変動が小さい地点では、気温別降水分布のパターンが0 付近に一つだけピークをもつタイプ(ひとこぶ型)であるのに対し、 T_s の変動が大きい地点は、ピークを二つ以上もつタイプ(多こぶ型)であることがわかった。さらに多こぶ型でも、ピークのうちの一つは0 付近に現れる事も明らかになった。0 付近に気温別降水量のピークが出る理由としては、プラスの温度下の降雪において、降雪が降ってくる最中に融解することで潜熱を吸収し、周りの空気の温度を0 付近まで下げるといったメカニズムが考えられる。このようなメカニズムは従来指摘されてこなかったものであり、温暖化に対する日本海側の降雪の応答は、現在考えられているものよりもより複雑である可能性を示唆している(Yamaguchi et al., 2013)。

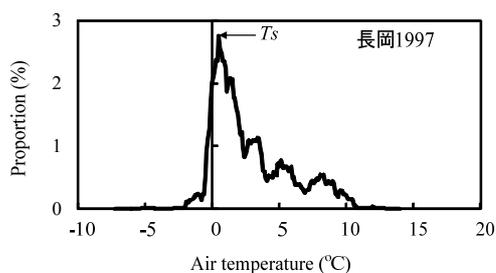


図3 長岡における気温別降水分布 (Yamaguchi et al., 2013 の図を改編)

(5) 積雪物性値の面的分布と季節変動

平地アメダスの気候値を用いた積雪の物性値の広域計算に関しては、入力データとして1)平年値を利用する方法(平年値法)、2)平年値に近い積雪深変化を示す年を数年選びだし、その気象データを利用して計算をし、計算結果を平均する方法(積雪深重視法)、3)最近10年間の気象データを入力データとして利用して計算を行い、計算結果を平均する方法(毎年平均法)、の3つの方法を試した。その結果、1)の方法では、北陸などの暖かい地方では、うまく積雪状況を再

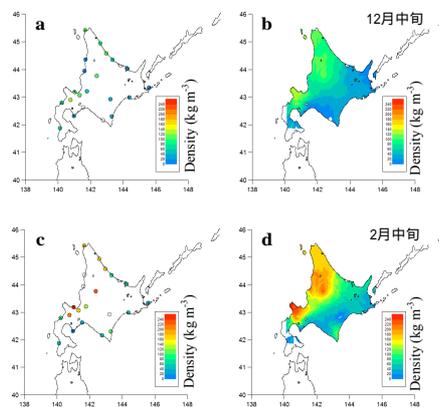


図4 北海道における全層平均密度(Density)の時空間変化の計算結果

a, b: 12月中旬
c, d: 2月中旬

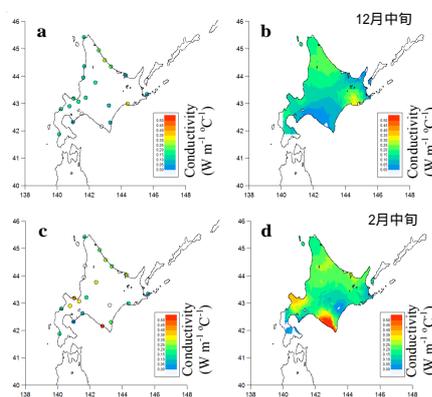


図5 北海道における全層平均熱伝導率(Conductivity)の時空間変化の計算結果

a, b: 12月中旬
c, d: 2月中旬

現できないことが分かった。これは平年値では降雪を引き起こすイベントがならされてしまうためである。2)並びに3)の方法に関して、どちらの方法でも、ある程度妥当な積雪状況を再現したが、両者の計算結果には若干の違いが表れた。そのため目的に応じて計算方法を使い分ける必要があることがわかった。

図4に”積雪深重視法”を用いて、12月中旬並びに2月中旬の北海道における積雪の全層平均密度(density)の分布がどのようになるかを計算した結果を、図5に”積雪深重視法”を用いて、12月中旬並びに2月中旬の北海道における積雪の全層平均熱伝導率(Conductivity)の分布がどのようになるかを計算した結果を示す。計算に使った平地のアメダス地点は北海道内にある21カ所である。

図4,5中において、a, cは個々のアメダスにおける計算結果、図4,5中のb, dは、個々のアメダスの計算結果からソフト(G-sharp)を用いて、面的分布を求めた結果を示して

いる。図4と5の結果から、同じ場所でも時期によって平均密度と平均熱伝導率の値が大きく異なること、同じ時期でも場所によって平均密度と平均熱伝導率が異なることがわかる。またそれらの分布の様子も時期によって大きく異なることも明らかになった。このことは、大気と積雪との熱のやりとりを考える際に、積雪の物性値を気候モデルや気象モデル内で一様の定数とするのは非現実的であることを示している。

今後も実際の気候・気象モデルを取り扱っている研究者と情報交換を続け、本研究成果をそれらのモデルに反映させるためのパラメタリゼーションの方法等に関する検討する予定である。

参考文献

(“5. 主な研究論文等”に挙げられているものは除く)

Hirashima, H., S. Yamaguchi, A. Sato, M. Lehing, 2010. Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve. *Cold Regions Science and Technology*, **64**, 94-103.

前野紀一・黒田登志雄(1986): 雪氷の構造と物性. 古今書院. 209pp

Matzl, M. and M., Schneebeli, 2006. Measuring specific surface area of snow by near-infrared photography. *Journal of Glaciology*, **52**, 558-564

Rikiishi, K., E. Hashiya, M. Imai, 2004. Linear trends of the length of snow-cover season in the Northern Hemisphere as observed by the satellites in the period 1972-2000. *Annals of Glaciology*, **38**, 229-237.

山口悟・阿部修・杉山慎・望月重人, 2010. しもざらめ化に伴う積雪の物理特性の変化に関する実験的研究. 寒地技術論文・報告集報告集, 70-74.

Yamaguchi, S., O. Abe, S. Nakai, A. Sato, 2011. Recent fluctuations of meteorological and snow conditions in Japanese mountains. *Annals of Glaciology*, **52**, 209-215.

Yamaguchi, S., T. Katsushima, A. Sato, T. Kumakura, 2010. Water retention curve of snow with different grain sizes. *Cold Regions Science and Technology*, **64**, 87-93.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線) *は本文中の引用文献

[雑誌論文](計 7件)

Yamaguchi, S., H. Motoyoshi, T. Tanikawa, T. Aoki, M. Niwano, Y. Takeuchi and Y. Endo, 2014. Application of snow specific surface area measurement using an optical method based on infrared reflectance with 900 nm wavelength to the wet snow zones in Japan, *Bulletin of*

Glaciological Research, 査読有, **32**, 印刷中.*

Yamaguchi, S., K. Iwamoto, S. Nakai, 2013. Interannual fluctuations of the relationship between winter precipitation and air temperature in the heavy-snowfall zone of Japan. *Annals of Glaciology*, 査読有, **54**, 183-188.*

平島寛行・山口悟, 2012, 断面観測及びライシメータのデータを用いた積雪水分移動モデルの検証, 寒地技術論文・報告集, 査読有, **28**, 44-48.*

山口悟・渡辺晋生・石井吉之, 2012, 積雪内部の水の移動に関する実験的研究, *日本水文科学会誌*, 査読有, 89-100.

Saito, K., S. Yamaguchi, H. Iwata, Y. Harazono, K. Kosugi, M. Lehning, M. Shulski, 2012. Climatic physical snowpack properties for large-scale modeling examined by observations and a physical model, *Polar Science*, 査読有, **6**, 79-95.*

Yamaguchi, S., K. Watanabe, T. Katsushima, A. Sato, T. Kumakura, 2012. Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. *Annals of Glaciology*, 査読有, **53**, 6-12.*

山口悟・佐藤威・望月重人, 2011, 積雪の圧縮粘性係数の気圧依存性に関する研究, 寒地技術論文・報告集報告集, 査読有, 42-45.*

[学会発表](計 9件)

山口悟, 本吉弘岐, 青木輝夫, 谷川朋範, 八久保晶弘. 体積含水率の変化に伴う積雪の近赤外領域の反射率の変化, 雪氷研究大会(2013・北見), 2013年9月17日-9月21日, 北見.

山口悟, 佐藤威, 望月重人, 八久保晶弘, 青木輝夫. 積雪の圧縮粘性係数に対する大気圧の効果. 雪氷研究大会(2013・北見), 2013年9月17日-9月21日, 北見.*

平島寛行・山口悟. 積雪中における水分移動のモデル化(2)-多次元水分移動モデルの開発 -, 雪氷研究大会(2012・福山), 2012年9月23日-9月27日, 福山.

山口悟・平島寛行・佐藤篤司. 融雪水の積雪内への不均一浸透と気象条件との関係, 雪氷研究大会(2012・福山), 2012年9月23日-9月27日, 福山.

平島寛行・山口悟・根本征樹. 積雪断面観測データを用いた積雪変質モデルの検証, 雪氷研究大会(2012・福山), 2012年9月23日-9月27日, 福山.*

Yamaguchi, S. and K. Watanabe. Application of soil physics to modeling the unsaturated hydraulic conductivity of snow cover, International symposium on seasonal snow and Ice, 2012年5月28日-6月1日, フィンランド.

Yamaguchi, S., K. Iwamoto and S. Nakai.

Interannual fluctuation of winter-precipitation
air-temperature relationship in the warm
temperature zone of Japan, International
symposium on seasonal snow and Ice, 2012 年
5月28日-6月1日, フィンランド

山口悟・渡辺晋生. 土壌分野の理論を応用
した積雪内部の水の移動に関する研究, 雪
氷研究大会(2011・長岡), 2011年9月19日
-9月23日, 長岡.

平島寛行・山口悟. 積雪-土壌間の水の移
動モデルの構築, 雪氷研究大会(2011・長岡),
2011年9月19日-9月23日, 長岡.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 悟 (YAMAGUCHI SATORU)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・
予測研究領域 雪氷防災研究センター・主
任研究員

研究者番号：70425510