

積雪内の氷板形成における気象条件の影響

Effects of weather condition on formation of ice layers in snowpack

北海道大学工学部
北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 正岡由仁 (Yuni Masaoka)
学生員 岡地寛季 (Hiroki Okachi)
正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. 背景と目的

積雪内の雪質とは、雪の粒子の形状、密度、含水量によって分類される。積雪内の密度の鉛直分布は積雪地帯の山岳地に冬期の間保存される水資源の見積もりを積雪深と合わせて推定する際に必要である。さらに、一般に弱層と呼ばれ、山岳地帯での雪崩の発生原因となる雪質（例えば氷板やしもざらめ雪）の形成過程を理解することにより、雪崩の発生機構を解明することや雪崩の発生リスクを予測することにつながる。

積雪内の雪質は、積雪内に含まれる固相・液相・気相の三相に関しての質量保存則、エネルギー保存則、運動量保存則と、以下に示す三つの仮定から成り立つ物理モデルにより推定される¹⁾。その仮定とは、i) 三相が同一の温度であること、ii) 積雪の圧密過程は氷相のみで行われること、iii) ラグランジュ座標系上での議論により氷相の質量保存則が自明となることである。物理モデルはこの仮定により4つの式系に簡素化される。同モデルの問題点の1つとして、氷板形成の再現性が低いことが挙げられる。前述の通り、氷板は雪崩の発生の原因の1つとして知られる²⁾。

氷板が発生する要因の1つは気温変化である。気温が0度を超えることで雪が融解し、その後気温が氷点下になることで、その融解水が再凍結し氷板が形成される。しかし、実際には氷板形成は気温の変化だけでは支配されない。その他の要因として融解水が浸透する速度が挙げられる。例えば、空隙が大きいざらめ雪内部では、融解水が浸透する速度が大きい。そのため、凍結する前に融解水は底面から流出してしまうか、あるいは凍結することができないため、氷板が形成されないと考えられる。

氷板は積雪断面観測により観測することができる。積雪断面観測は積雪を掘削し、その断面から雪温や雪の密

度、大きさ、形状の鉛直プロファイルを観測する。同手法は実際に雪山に登り作業を行うことから危険を伴うため、観測自体が困難である。著者らは積雪断面観測を寒地土木研究所が管理する定山溪流木処理場で12年間行い、積雪断面の貴重な情報を蓄積してきた。また同観測地点において、気象観測を連続的に行った。

本研究では、積雪断面観測から得られる氷板の個数や厚さおよび気象観測データより、氷板が形成される1つの要因である気温の変化に着目した。第2章に観測の概要と氷板の形成状況を示し、第3章で氷板の形成状況と気温差を比較する。第4章に結果とまとめを記す。

2. 観測の概要と氷板の形成状況

積雪断面観測は、札幌市南区にある寒地土木研究所の定山溪流木処理場（図-1）で行った。本研究では、2007年度から2015年度と、2018年度に各年度5回程度行った全68回の積雪断面観測のデータを用いる。また、同地点にて観測した気温、相対湿度、風速、日射量、雪面温度、降水量、積雪深のデータも利用した。

図-2に氷板の厚さごとの枚数を示すヒストグラムを示す。2007年度から2015年度、2018年度で行った全68回の積雪断面観測で確認された氷板の合計枚数は154枚であった。これらの氷板は、積雪表面から地表面付近にかけて、積雪内の様々な位置に形成されていることが確認された。また、氷板の厚さは最大で5cmであった。全体の約83%にあたる128枚が1cm以下であった。

図-3, 4に気象データの時系列とその期間中に行った積雪断面観測の結果を示す。積雪は雪質の異なる層が積み重なった構造をしている。雪質は日本雪氷学会によって便宜的に分類²⁾され、堆積直後から新雪→こしまり雪→しまり雪→ざらめ雪の順に変化する。堆積した雪の上に、新たな降雪が堆積することによって圧密沈下され、



図-1 観測地点を示す地図。

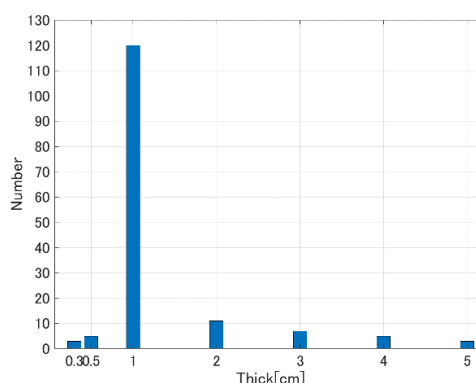


図-2 氷板の厚さと枚数のヒストグラム（観測期間は2007年度～2015年度、2018年度）

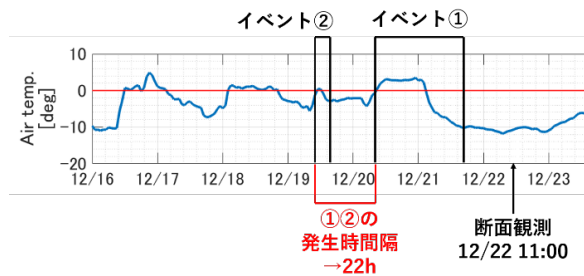


図-3 2014年12月16日から12月23日までの気温の時系列（青実線），赤実線は気温0度を示す。

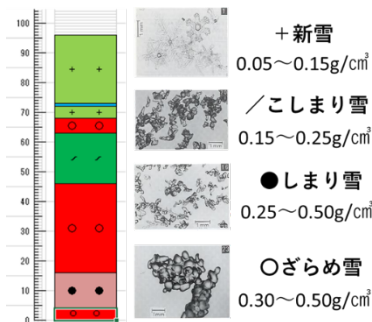


図-4 2014年12月22日に行った断面観測結果と雪の形状の写真（写真は秋田谷・若林(1998)より転載）

密度が増す。その過程で雪の粒子の形状も変化する。ただし、気温、湿度、日射量などの影響で霜や氷板などに变质することがあり、これらが雪崩の発生原因となる。

図-3に2014年12月16日から12月23日の気温の時系列を示す。氷板は気温の変化は0°C以上に上昇した後に再び氷点下に下がることで融解・再凍結が起きる時に形成される。ただし、気温の最大値が大きい場合や0°C以上の継続時間が長い場合は積雪のざらめ化が進行し、氷板が形成されない可能性もある。氷板形成のために必要な条件はその気温差や気温が0度以上の継続時間の条件が存在すると考えられる。

3. 氷板の形成状況の分析

ここでは地表面に最も近い氷板の形成に着目をした。図-4に示す2014年12月22日の断面観測結果より地表からの高さ70cm程度のところに氷板があることが確認される。図-3の気温の時系列において観測日の22日の数日前からの気温の変化に注目すると、12月20日に+1°Cまで上昇し、22日にかけて-10°C以下まで下降している。この過程で積雪表面の雪が融解・再凍結し、氷板を形成したと考えられる。積雪深と降雪量を確認したところ22日に10mm/dayの降水量を記録し、それに伴って20cm程度、積雪深の増加がみられた。これが断面観測結果における氷板上部の新雪層の厚さとほぼ一致していることからイベント①において形成されたと推定できる。このように、積雪表面に近い氷板であれば、0°Cをまたぐ気温差が生じているイベントに注目することで、形成時期の推定が可能である。しかし、氷板の厚さは1cmを超える事例が存在する。近藤・山崎（1987）を参考に積雪表面の熱収支を解くと、気温がプラスからマイナスへ

表-1 氷板が形成されたイベント発生時（気温がマイナスからプラスへと変化した時刻を基準）から過去に遡って二つ目のイベントが発生した時刻と氷板の厚みの関係。

		①と②の発生時間隔				合計
		～24h	～48h	～72h	72h～	
氷板の厚さ	1cm	12	1	2	11	26
	2cm	1	0	0	0	1
	3cm	0	0	0	0	0
	4cm	1	0	0	0	1
	5cm	0	0	0	0	0

変化する一イベントにおいて融解し凍結する水の質量は1~2kg/m²/hで、最大でも3kg/m²/h程度であった。つまり、理論上、最大でも1時間で3mm程度の氷板しか形成されない。そこで、本研究では1cmより分厚い氷板形成には一イベント以上での融解が必要と仮定し、さらに時間を遡ったもう一イベントが発生する時刻を調べた。氷板が形成されたとされるイベントの発生時刻を気温が0度を超えた時刻を基準とする。基準イベントの直前に発生したイベントにおいて気温が0度を超える時刻と基準時刻の時間差をまとめた。その結果を表-1に示す。

4. 結果と考察

表-1より2cm以上の厚さの氷板形成時は24時間以内に1回以上気温が0°Cを超えていた。これは1度目に形成された氷板上に2度目のイベント時の融解水が達し、凍結したことを示唆する。一方で、1cm程度の薄い氷板が形成されたときでも24時間以内に複数回、気温が0°Cをまたぐイベントが発生している例が12回ある。これらのうちの8回は形成された氷板の10cmほど下に別の氷板が形成されていた。このように気温が0度を超えるイベントが24時間以内に複数回発生する場合であっても2cmより分厚い氷板が形成されない事例がある。これは1度目のイベントで形成された氷板の深さまで2度目のイベントの融解水が達しなかったためだと考える。このことから氷板形成には気温の変化だけではなく水、が浸透する速度がより分厚い氷板を形成する条件であると考えられる。今後は融解水の浸透速度に着目し、氷板が形成される条件を明らかにする。

謝辞：本研究は、ArCS、基盤研究A(19H00963)の成果の一部である。

5. 参考文献

- 1) Perry Bartelt, Michael Lehning : A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part I: numerical model, Cold Regions Science and Technology 35, pp. 123-145, 2002.
- 2) 尾関俊浩, 秋田谷英次 : サン・クラストの形成機構 : その1, 低温科学. 物理篇, 51, pp.13-21, 1993.
- 3) 秋田谷英次, 若林隆三 : 積雪・雪崩分類, 公益社団法人日本雪氷学会事務局, 1998.
- 4) 近藤純正, 山崎剛 : 熱収支法による融雪量の予測, 日本雪氷学会誌 49 巻 4 号, pp.181-191, 1987.