

アメダスデータを用いた雪質推定モデルによるスキー場雪質評価

山本千雅子*¹、大島淳一*²

1. はじめに

本研究の目的は、入手可能な気象データを使ったスキーヤーの感覚に基づくスキー場の雪質評価方法の提案である。積雪の分類方法としては、(社)日本雪氷学会¹⁾や International Classification for Seasonal Snow on the Ground²⁾、スキー・ワックス・メーカーによる分類などがある。しかし、スキー場の雪質の分類方法、ならびに入手可能な気象データによる雪質の定量的評価の先事例はない。そこで本研究では、1) 既存の積雪の分類と積雪の性質に関する研究を比較し、2) スキーヤーの感覚に基づいたスキー場の雪質の分類方法を提案し、3) 近隣のアメダス観測点データを用いたスキー場の雪質推定モデルを提案し、4) そのモデルを使い、日本の代表的なスキー場であるニセコひらふ(北海道)、富良野(北海道)、白馬(長野県)、磐梯(福島県)、妙高(新潟県)の雪質を推定し、スキーヤーに好まれる雪質という視点から評価を行った。

2. 既存の雪の分類方法

代表的な積雪の分類としては表1に示す(社)日本雪氷学会(1998)による分類¹⁾と International Classification for Seasonal Snow on the Ground (1985)²⁾がある。表2はノルウェーのスキー・ワックス・メーカーSWIX 社がワックス選択を目的に開発したスキーコースやスキー場の雪質分類(2006)³⁾である。しかし、これらはそれぞれの目的に合わせて開発されたものであり、スキー場の雪質のスキーヤーの視点からの分類にはそのままでは適用できない。

3. スキー場の雪質の分類

3.1 スキーヤーによる雪質の言語表現

日本全国の主要スキー場の雪質を体験している全日本スキー連盟の競技役員経験者数名に、一般的にスキー場の雪質をどう表現するかについてインタビューを行った。『雪が／すべりが、軽い／重い』と『雪が、固い／柔らかい／粗い』、『新雪／(新雪ではない)雪』、『粉雪／湿雪』が主な言語表現として得られ、表3は雪質を表す形容詞を対比するようにリストアップしたものである。

3.2 雪の性質

表3に示す形容詞で表現される雪質とは、前述の SWIX 社や日本雪氷学会(1998)による雪質分類等ではどの雪質に該

表1. 日本雪氷学会による雪質分類¹⁾

雪質: grain shape		Graphic symbol	説明
日本語名	英語名	記号:F	
新雪	New snow	+	降雪の結晶形が残っているもの。みぞれやあられを含む。結晶形が明瞭ならその形(樹枝等)や雲粒の有無の付記が望ましい。大粒のあられも保存され指標となるので付記が望ましい。
こしまり雪	Lightly compacted snow	/**	新雪としまり雪の中間。降雪結晶の形は殆ど残っていないが、しまり雪にはなっていないもの。
しまり雪	Compacted snow	●**	こしまり雪がさらに圧密と焼結によってできた丸みのある氷の粒。粒は互いに網目状につながり丈夫。
ざらめ雪	Granular snow	○**	水を含んで粗大化した丸い氷の粒や、水を含んだ雪が再凍結した大きな丸い粒が連なったもの。
こしもざらめ雪	Solid-type depth hoar	□	小さな温度勾配の作用でできた平らな面をもった粒、板状、柱状がある。もとの雪質により大きさは様々。
しもさらめ雪	Depth hoar	~	骸晶(コップ)状の粒からなる。大きな温度勾配の作用により、もとの雪粒が霜に置き換わったもの。著しく硬いものもある。
氷板*	Ice layer	—	板状の氷。地表面や層の間ができる。厚さは様々。
表面霜*	Surface hoar	~	空気中の水蒸気が表面に凝結してできた霜。大きなものは羊歯状のものが多い。放射冷却で表面が冷えた夜間に発達する。
クラスト*	crust	▽	表面近傍にできる薄い硬い層。サンクラスト、レインクラスト、ウインドラスト等がある。

表2. SWIX 社によるワックス選択を目的とするスキー場の積雪分類³⁾

雪質	記号	説明
新雪(氷点下)		降雪中ならびに新雪で、結晶の形が比較的はっきりしている。
粉雪(氷点下)		雪の結晶が氷粒に変化する途中段階で、ひとつひとつの雪粒のもとの結晶が分からないほど変化している。
古く、粒雪状で、変化した雪		変化の最終段階。雪面が角の取れた均一な雪粒となるのが特徴である。古雪とも呼ばれる。
湿雪(気温がプラス)		湿った雪。上記の雪粒が暖かい大気に露出すると、湿雪になる。
凍結(氷点下)		湿雪が凍結あるいは再凍結したもの。大きな雪粒同士が凍結した融雪水で結合している。雪面は固く、凍結状態。

当するか、積雪の性質について文献調査を行った。

* グラデュス・マルチリンガルサービス株式会社 ** 社団法人雪センター 本論文は、2007年ゆきみらい研究発表会で発表した物です。照断転載ご遠慮ください。連絡先: グラデュス・マルチリンガルサービス株式会社 chigako.y@gradus.net

表3. スキー場の雪質の表現

主語	形容詞	表現された雪の状態
雪が	軽い	新雪。ふわふわ雪。乾き雪。
	重い	湿雪。綿雪。解けた雪。
スキーのすべりが	軽い	スキーと雪面の摩擦が小さな雪。
	重い	スキーと雪面の摩擦が大きな雪。
雪が	固い	締まっている雪。圧雪されている。しまり雪。
	硬い	低温になって硬くなった雪。
	粗い	ざらめ雪やアイスバーン。
	柔らかい	圧雪されていない。新雪。
(雪が)	新雪	降雪中、あるいは降雪直後。雪上車で圧雪されていない。
	(新雪以外の)雪	前日およびその前に降った雪。古い雪
(雪が)	粉雪	締まりにくい雪。水分が少ない雪。低温の雪。
	湿雪	水分の多い雪。解けた雪。

3. 2. 1 スキーと雪の摩擦の関係

SWIX 社の SWIX Sport Nordic Tech Manual (2006)³⁾によると、雪氷表面の摩擦は、完全な乾燥摩擦でもないし完全な流体摩擦でもなく、双方の摩擦が発生している。つまり、雪の結晶や雪の粒が乾燥摩擦を生じさせる一方、雪面を滑走するときにスキーと雪面の間にできる水の層が流体摩擦を生じさせる。この水の層厚と雪粒の荒さで滑走時の摩擦が変わる。新雪(降雪後 24 時間以内)は、結晶の形がシャープなため、強い乾燥摩擦を生じる。

雪面の温度が下がると水の層は薄くなり、水の層を貫いた結晶とスキー滑走面との間に強い乾燥摩擦を生じる。したがって温度が下がるにつれ、乾燥摩擦の法則が支配的になる。図1に示すように -10°C 以下になると、摩擦は一段と大きくなる(対馬等、1969)⁴⁾。

大気温度が上がるとスキー面と雪面の間にできる水の層厚が増す。 $-10^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$ の範囲のときにスキーと雪面の間に生じる水の層厚は雪粒の影響が少ない厚さであるが、流体摩擦もそれ程大きくはない。

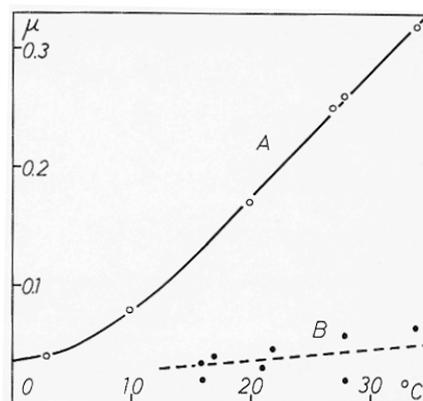
大気温度が -4°C から 0°C に近づくと、積雪表面の雪が融けだし、雪の結晶の周囲は飽和状態になる。この自由水(0°C 付近で融解する水)が結晶同士の接触面に入り込むと結晶同士が接着し、大きな雪粒となる。雪粒が大きくなると雪粒とスキー滑走面の接触面積が増えるので、摩擦も大きくなる。

したがって、 -10°C 、 -4°C 、 0°C が雪質にとって重要な閾値である。

3. 2. 2 雪の温度と大気温度の関係

大気温度が上がると雪の温度も上昇するが、 0°C に達すると

それ以上にはならない。つまり、大気温度が 0°C 以上のとき、大気温度にかかわらず雪の温度は 0°C である。また、大気温度が上昇して 0°C を超えてもすぐに雪面温度は 0°C にはならないし、大気温度が氷点下になってもすぐに雪面温度は大気温度まで下がらず、タイムラグがある。大気温度の変化と雪面の温度変化には、大気温度がどこまで上がっているかが大きく影響する。藤岡(1957)⁵⁾によると(図2)大気温度が氷点下の場合、気温よりも雪面の温度が 2°C ほど低い。



横軸が温度でAは低速摩擦、Bは高速摩擦。スキーはAに該当する。横軸の温度目盛にはマイナス記号が省略されている。

図1. 摩擦係数と温度の関係⁴⁾

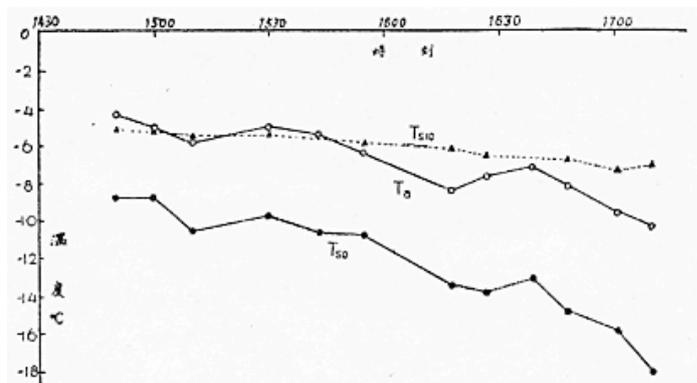


図2. 気温および雪温(藤岡、1957)⁵⁾

3. 2. 3 スキー場の雪質分類

表4は、SWIX 社の雪質分類をもとに、日本雪氷学会(1998)による雪の分類等から、スキーヤーの言語表現にあてはまる雪質を定義したものである。

新雪は、降雪時の大気温度が 0°C 未満のときに新雪(乾き雪)、 0°C 以上のときは新雪(湿り雪)に分けられる。スキー場近傍のアメダスデータでみると、降雪と日最高気温が同時に起こることはほとんどないため、日平均気温 0°C 未満であれば新雪(乾き雪)とした。こしまり雪としまり雪は日本雪氷学会の積雪分類に準じた。

古雪は、藤岡(1957)⁵⁾から大気温度が 2°C に達したときに雪面温度が 0°C になると推定されることから、日最高気温が 2°C

を超えるときは、ざらめ雪(湿雪)でそれ以外をしまり雪(古雪)とした。

表4. スキーヤーの視点からみたスキー場の雪質分類

スキーヤーの雪質言語表現	分類	雪の状態
軽い。ふわふわ。	新雪(乾き雪):A	大気温度が摂氏0度以下のとき。降雪中、あるいは降雪直後(24時間以内)の雪*。結晶の形が明確。
軽い。	こしまり雪(粉雪):B	降雪後も摂氏0度以下が継続したとき。新雪から古い雪なる中間の雪。もともとの結晶の形がわかる。
軽く、固い	しまり雪(古雪):C	降雪後も摂氏0度以下が継続したとき。結晶の形はなくなり、どれも同じような形状の雪粒。
重い。べたべた。	新雪(湿り雪):D	大気温度が摂氏0度以上のとき。湿った重い雪。
重い。	ざらめ雪(湿雪):E	大気温度が摂氏0度以上のときに表面の雪が解けて水を含んだ状態。雪粒の間に自由水が入り、いくつかの雪粒が結びついたので、雪粒が大きい。
硬い。粗い。	ざらめ雪(再凍結):F	大気温度が摂氏0度以上になり、その後摂氏0度以下に下がったときに、湿雪の表面が再凍結したものの。

*新雪でも雪上車で圧雪したときは、新雪には分類されず古雪に分類される。

ざらめ雪が湿雪のときと、凍結状態にあるときにはスキーヤーにとって大きな違いがある。凍結すると湿雪よりも摩擦は小さくなるが、表面は粗く、足にかかる負担が大きいからである。そこで SWIX 社の雪質分類にならい、ざらめ雪(湿雪)とざらめ雪(再凍結)に分けた。日最高気温が 2℃を閾値とし、2℃以上のときをざらめ雪(湿雪)、2℃未満をざらめ雪(再凍結)とした。

既存文献から、雪面温度が-10℃以下になるとスキーと雪面の摩擦が強くなる。すべりも重く、俗にいう「雪がきしむ」状態である。しかし一般に日本のスキー場では北海道や東北北海道を除いて、それほど日中の気温が低くならず、-10℃以下が継続することはあまりない。

表5(1)の雪質分類モデルは、-4~-5℃と-10℃前後で雪の摩擦が変化することを考慮したものである。しかし、日本

表6. 近隣アメダスデータによるスキー場の雪質推定モデル

分類	月別日データ
新雪(乾き雪):A	日降水量>0 かつ 日平均気温<0
こしまり雪(粉雪):B	前日がA かつ 日降水量=0 かつ 日最高気温<0
しまり雪(古雪):C	前日がBかC かつ 日降水量=0 かつ 日最高気温<0
新雪(湿り雪):D	日降水量>0 かつ 日平均気温≥0
ざらめ雪(湿雪):E	日降水量=0 かつ 日最高気温≥2*
ざらめ雪(再凍結):F	前日がEかD かつ 日降水量=0 かつ 日最高気温<2

*藤岡(1957)から、大気温度と雪面温度の差は摂氏 2 度ほどあるので大気温度+2℃を、乾き雪が湿り雪に変わる閾値とした。

では頻繁に大気温度が-10℃以下になるスキー場は限られていることから、0℃を基準としたより簡便な雪質分類モデル(表5(2))を作成した。-4~-5℃と-10℃前後の摩擦の変化は、一般スキーヤーにとって乾き雪と湿雪との差ほどの重要性はない。したがって簡便モデルで大方の日本のスキー場の雪質は十分に分析可能である。

表6は、簡便モデルに従い雪質を推定するモデルで、アメダス観測点データを用いた分析が可能である。雪質の推定は日単位とし、月別日データの気温度(日最高気温、日平均気温)と日降水量から推定を行う。観測点はスキー場よりも標高が低い、標高による大気温度の補正は行っていない。

4. 日本のスキー場の雪質推定と評価

4.1 推定対象

代表的なスキー場としてニセコひらふスキー場に加え、富良野(北海道)、白馬(長野県)、磐梯(福島県)、妙高(新潟県)のスキー場の日別の雪質を、近隣のアメダス観測点データを表6のモデルに用いて推定した。それぞれ用いたアメダス観測点

表5(1). スキー場の雪質分類モデル

気温(°C)		-22	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
降雪	結晶の種類 ¹⁾	角柱			角板			角柱			角板							
	雪片 ²⁾	小			大			小			大							
雪温(°C)		-22	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
積雪	新雪 ³⁾	新雪(摩擦大):A			新雪(摩擦小):A			新雪(摩擦大):A			新雪(摩擦小):A			湿り雪:D				
	氷点下 ⁴⁾ 0度以上	こしまり雪(摩擦大):B			こしまり雪(摩擦小):B			こしまり雪(摩擦大):B			こしまり雪(摩擦小):B			ざらめ雪(湿雪):E				
		しまり雪(摩擦大):C			しまり雪(摩擦小):C			しまり雪(摩擦大):C			しまり雪(摩擦小):C							
	再凍結	ざらめ雪(再凍結):F																

表5(2). 日本のスキー場の雪質分類モデル (簡便モデル)

気温(°C)		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	
降雪	結晶の種類 ¹⁾	角柱			角板								
	雪片 ²⁾	小			大								
雪温(°C)		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0				
積雪	新雪 ³⁾	新雪(乾き雪):A			新雪(乾き雪):A			湿り雪:D					
	氷点下 ⁴⁾ 0度以上	こしまり雪:B			こしまり雪:B			こしまり雪:B			ざらめ雪(湿雪):E		
		しまり雪(古雪):C			しまり雪(古雪):C			しまり雪(古雪):C					
	再凍結	ざらめ雪(再凍結):F											

1) International Classification for Seasonal Snow on the Ground

2) 気象科学事典(日本気象学会 1998)

3) SWIX Nordic Ski Preparation, Racing 2006

http://www.swixsport.de/ski/data_doc/47-PR0508ENG_XC_170dpi.pdf

4) 日本雪氷学会(こしまり雪としまり雪の区分)、SWIX Nordic Ski Preparation Racing 2006(摩擦係数の区分)

各雪質分類に該当する日数の月平均値
 (平成17年12月～平成18年3月)
 (観測点:北海道倶知安)

表7. ニセコひらふ(北海道)、富良野(北海道)、白馬(長野県)、磐梯(福島県)、妙高(新潟県)スキー場の各雪質分類に該当する月別日数と月平均値の比較(平成17年12月～平成18年3月)

スキー場	アメダス観測点		新雪 (乾き雪)	こしまり雪 (粉雪)	しまり雪	新雪 (湿り雪)	ざらめ雪 (湿雪)	ざらめ雪 (再凍結)
ニセコひらふ	倶知安(北海道)	2005年12月	29	0	0	0	2	0
		2006年1月	29	1	0	0	1	0
		2006年2月	22	2	0	4	0	0
		2006年3月	18	0	0	12	1	0
		月平均	24.5	0.8	0	4	1	0
アルツ磐梯	猪苗代(福島県)	2005年12月	13	4	10	4	0	0
		2006年1月	7	3	5	2	9	5
		2006年2月	6	3	1	6	11	1
		2006年3月	6	1	1	8	15	0
		月平均	8	2.8	4.3	5	8.8	1.5
妙高 (斑尾高原スキー場)	関山(新潟)	2005年12月	17	0	0	10	4	0
		2006年1月	21	0	1	5	4	0
		2006年2月	9	0	0	10	9	0
		2006年3月	6	0	0	14	11	0
		月平均	13.3	0	0.3	9.8	7	0
白馬 (白馬八方尾根スキー場)	白馬(長野)	2005年12月	24	3	1	2	1	0
		2006年1月	14	4	3	1	5	4
		2006年2月	11	1	0	6	10	0
		2006年3月	8	0	2	10	11	0
		月平均	14.3	2	1.5	4.8	6.8	1
富良野	富良野(北海道)	2005年12月	10	4	16	1	0	0
		2006年1月	6	3	22	0	0	0
		2006年2月	11	4	6	1	5	1
		2006年3月	13	3	0	4	11	0
		月平均	10	3.5	11	1.5	4	0.3

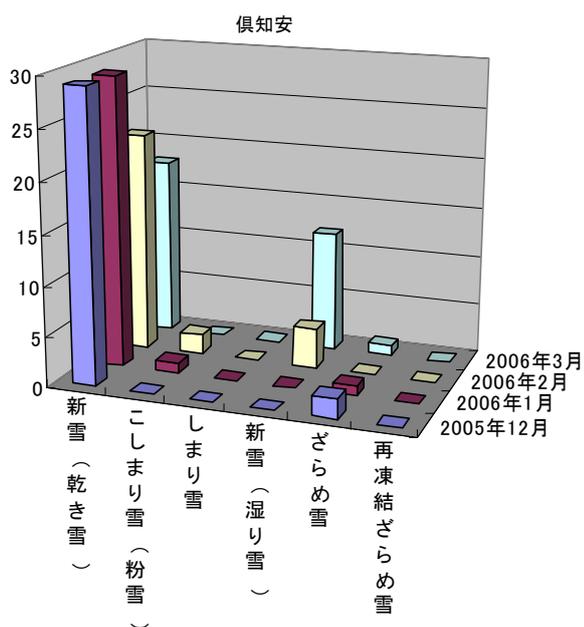


図3(1). ニセコひらふスキー場

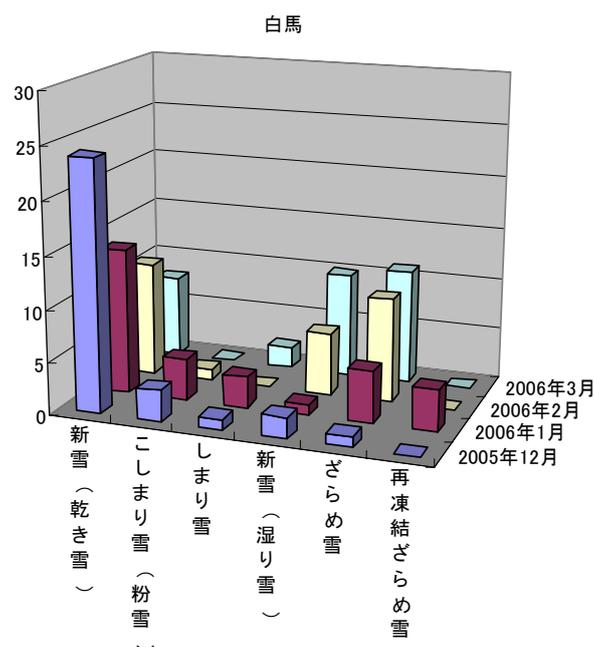


図3(2). 白馬スキー場
 各雪質分類に該当する日数の月平均値

(平成17年12月～平成18年3月)
(観測点:長野県白馬)

猪苗代

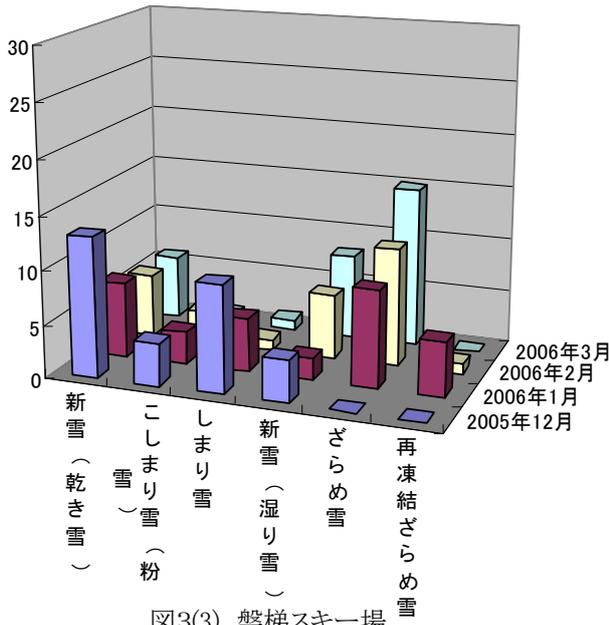


図3(3). 磐梯スキー場
各雪質分類に該当する日数の月平均値
(平成17年12月～平成18年3月)
(観測点:福島県猪苗代)

関山

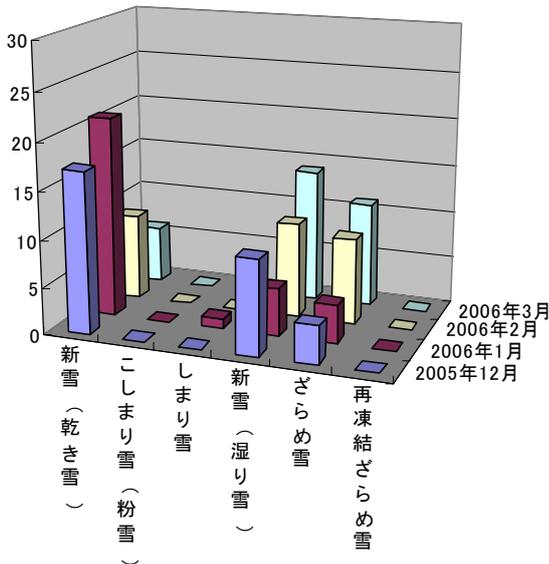


図3(4). 妙高スキー場
各雪質分類に該当する日数の月平均値
(平成17年12月～平成18年3月)
(観測点:新潟県関山)

月から3月の積雪深の平均値である。

富良野

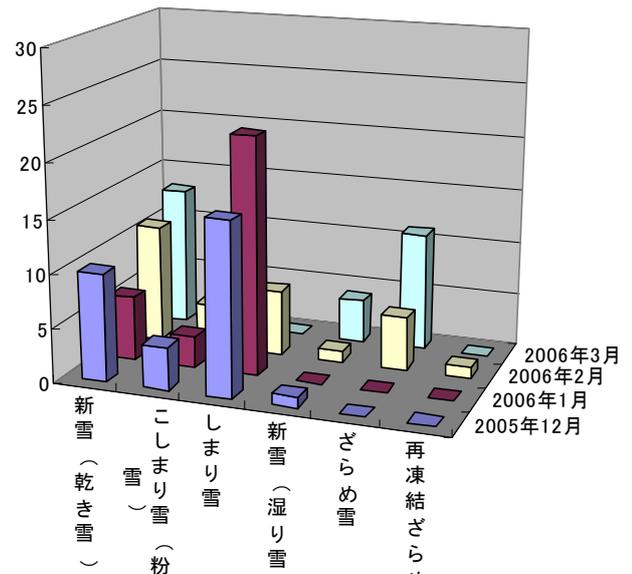


図3(5). 富良野スキー場
各雪質分類に該当する日数の月平均値
(平成17年12月～平成18年3月)
(観測点:北海道富良野)

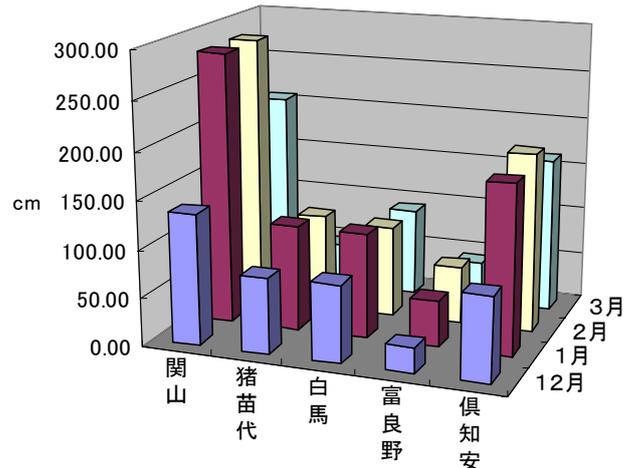


図4. ニセコひらふ(北海道)、富良野(北海道)、白馬(長野県)、磐梯(福島県)、妙高(新潟県)スキー場の近隣アメダス観測点データによる積雪深の月平均値
(平成17年12月～平成18年3月)

4.2 スキーヤーの視点による雪質の評価

スキーヤーによる雪質評価の一例として、ニセコひらふに来訪した豪州人スキーヤーを対象とするアンケートでは、「パウダースノー」をニセコひらふの一番の魅力という回答者が75%⁶⁾であったことから、本研究では、「乾いた雪」である新雪(乾き雪)とこしまり雪、しまり雪を総称して「乾き雪」と呼び、これを一般スキーヤーの好む雪として各スキー場の雪質評価を行うこととした。

図5(1)～(2)は、本調査の雪質推定を用いた各スキー場の乾き雪雪質日数(新雪、こしまり雪、しまり雪)とそれ以外の雪質(湿り雪、ざらめ雪、再凍結ざらめ雪)日数を12月～2月と1

は、倶知安(ニセコひらふ)、富良野(富良野)、白馬(白馬)、猪苗代(磐梯)、関山(妙高)である。表7は各雪質に分類される日数をスキー場別にまとめたものである。図3(1)～(5)は、12月から3月まで月別に各スキー場における上記の雪質分類A～Fの日数を示す。

図4は、各スキー場の近郊のアメダス観測点データによる12

2月～3月について月平均日数を比較したものである。

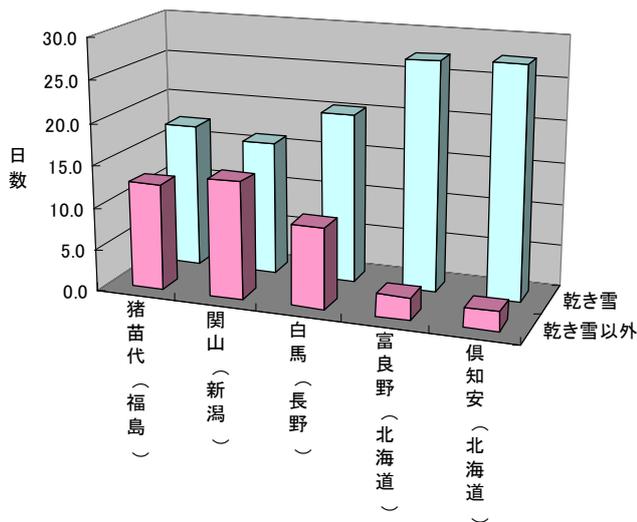


図5(1). ニセコひらふ(北海道)、富良野(北海道)、白馬(長野県)、磐梯(福島県)、妙高(新潟県)スキー場の近隣アメダス観測点データによる乾き雪日数(新雪、こしまり雪、しまり雪)とそれ以外の日数の月平均値の比較(平成17年12月～平成18年2月)

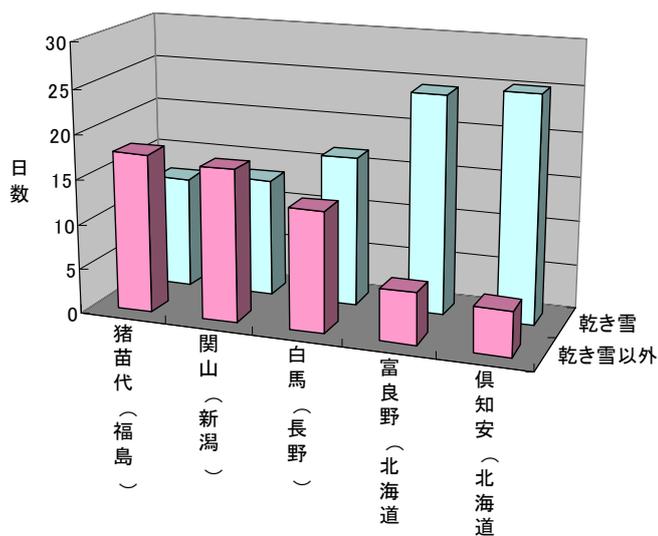


図5(2). ニセコひらふ(北海道)、富良野(北海道)、白馬(長野県)、磐梯(福島県)、妙高(新潟県)スキー場の近隣アメダス観測点データによる乾き雪(新雪、こしまり雪、しまり雪)とそれ以外(湿り雪、ざらめ雪、再凍結ざらめ雪)日数の月平均値の比較(平成17年12月～平成18年3月)

4.3 各スキー場の雪質の特徴と評価

1) ニセコひらふ

他のスキー場と比較して、新雪(乾き雪)の日が圧倒的に多い。1月～2月には乾き雪のさらさらした新雪がほぼ毎日のように降っている。降雪量の多さ(積雪深)のみならず、降雪日数が多いことが特徴である。

2) 白馬

1月は2日に一回、2月には3日に一回は新雪が降り、安定した積雪量がある。2月になると湿雪、ざらめ雪の日が多い。

3) 磐梯

12月の雪は、量と質の両面で優れている。1～月はざらめ雪に加え新雪(湿り雪)の日が多い。

4) 妙高

調査対象となった平成17年度の冬期は記録的な豪雪であったため一概には言えないが、積雪が安定している。1月の新雪は乾き雪が多いが、2月以降は新雪も湿り雪が多く、ざらめ雪日数も多い。

5) 富良野

同じ北海道でも、富良野の場合は降雪日数が少ないので、新雪(乾き雪)日数は少ない。盆地のため低温が特徴で、1月～2月はしまり雪の日が多い。気温が -10°C 以下になる日も多いので、俗に「雪がきしむ」と表現される、低温のためスキーと雪面の摩擦が大きな日も多い。したがってニセコひらふほどスキー客にとって軽い雪質ではない。

5. まとめと今後の方向

本論文はスキー場の雪質の分類モデルを提案し、それに基づいて近隣アメダス観測点データから日単位で雪質を推定し、スキー場の雪質の定量化を行った。推定された各雪質の月平均日数を求め、同じスキー場の月別比較とスキー場間の月比較とシーズン比較を行った。その結果、ニセコひらふは圧倒的に乾き雪の新雪の降雪日数が多いことが明らかになり、豪州スキーヤーに人気のある安定したパウダースノーを裏付ける結果になった。

今後の研究課題は、本研究で提案したモデルによるスキー場の雪質判定とスキー場の実際の雪質が一致しているかどうかについての検証である。

6. 謝辞

本研究は、国土交通省総合政策局の『平成17年度積雪地域における観光地域づくりに関する基礎調査』の一部として行われました。関係各位に御礼申し上げます。

7. 参考文献

- 1) (社)日本雪氷学会による積雪分類、1998
- 2) International Classification for Seasonal Snow on the Ground、1985
- 3) SWIX Sport Nordic Tech Manual、SWIX、2006
http://www.swixsport.de/ski/data_doc/47-PR0508ENG_XC_170dpi.pdf (平成18年6月アクセス)
- 4) 「氷の摩擦融解」、『低温科学 物理篇 第27巻』、対馬勝年、吉田順五、1969
- 5) 「スキーの研究(3)」、『低温科学 物理篇 第16巻』、藤岡敏夫、1957
- 6) 「海外観光客増加による冬期観光の経済波及効果基礎調査」、『平成17年度ゆきみらい研究発表会論文集』、山本千

雅子、大島淳一、野村亜希子、佐藤馨一