

スキー板材と雪とのインターラクションによる滑走性向上

下田 一哉^a

^a(国研)物質・材料研究機構 構造材料研究センター(〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1)

Interaction Between Ski and Snow for Excellent Gliding Performance

Kazuya SHIMODA^a

^aResearch Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science (1-2-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0047)

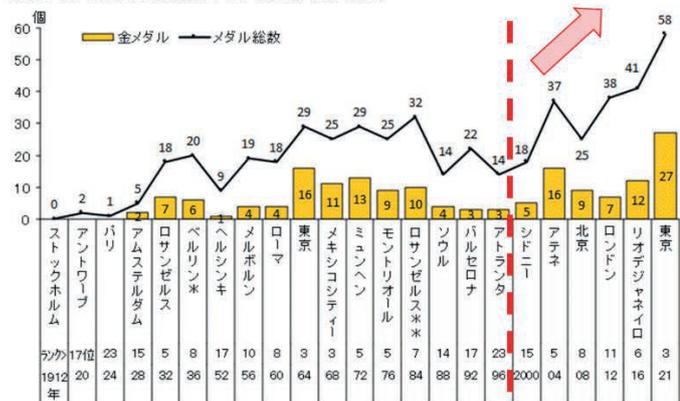
Keywords : Ski, Snow, Wax, Gliding Performance

1. はじめに

1年延期となった東京オリンピック・パラリンピックが2021年に開催され、翌2022年に北京冬季オリンピック・パラリンピックが開催され日本選手の輝かしい活躍はまだ記憶に新しい。今年8月にはパリオリンピック・パラリンピックがひかえ、選考レースの激しさが我々のスポーツ熱を再加熱してくれている。オリンピック等の国際競技大会で好成績を収める、すなわち国際競技力向上のために様々な試みが行われているが、日本でも2000年以降、選手を医・科学の側面からサポートする国立スポーツ科学センター(JISS)や各種トレーニング施設と宿泊所が完備されたナショナルトレーニングセンター(NTC)を設置し、2016年にオリンピック・パラリンピックの一体的強化を目的にJISSとNTCを統合し組織名を「ハイパフォーマンススポーツセンター」(HPSC)に改称しスポーツの強化に貢献している¹⁾。スポーツ庁では、2016年のリオデジャネイロオリンピック・パラリンピック競技大会以降、「競技力強化のための今後の支援方針(鈴木博

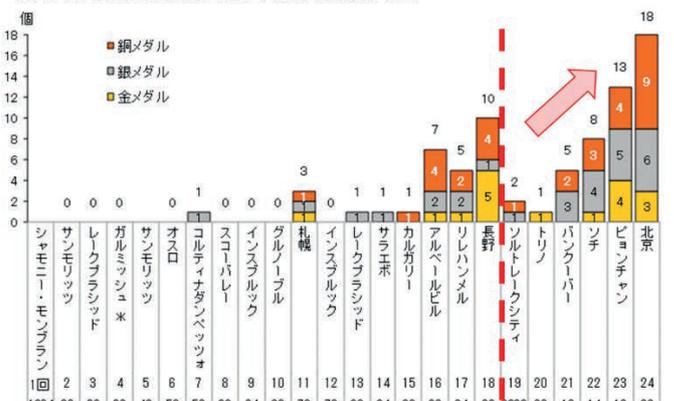
ラン)」を策定し、国際競技力向上に取り組んできた^{2),3)}。図1に示すように、東京と北京大会とも過去最高のメダル獲得総数だけでなくメダル獲得の最年少記録の更新や、若い世代の活躍や女子種目における過去最多のメダル獲得など女性アスリートの活躍も目立ち、過去最高の成績を取めた。物質・材料研究機構では、国内の国立研究機関として唯一ウィンタースポーツの競技者と協力しながらの研究を10年以上続けてきた⁴⁾。用具を用いる競技においては、競技者の技量だけでなく用具そのものの性能によって競技成績が大きく左右されるため、より高性能の用具開発が必要である。用具に求められる特性の一つとして、用具が物質(固体・液体・気体)に接する面の低摩擦化が挙げられる。例えば、スキー距離競技やスピードスケート競技におけるタイム短縮あるいはスキージャンプ競技の飛距離向上には、競技用具(スキー板、スケートブレード)が雪・氷と接する面を低摩擦化させることが好成績につながることは自明である。本稿ではスキー競技に協力する過程で培ってきた滑走性を向上させるためのスキー板材と様々な雪とのインターラクションに関する知識・知見を、

夏季オリンピックにおける日本のメダル数(金メダル)



(注)1916年ベルリン、44年ロンドンでは中止。40年東京は返上。同年ヘルシンキは中止。48年ロンドン、80年モスクワは日本不参加。1936年ベルリンのメダル数20には芸術競技銅2を含む。ランクは金銀銅の順の優先ランキング
* 朝鮮半島出身の孫基禎選手(マラソン)の金メダルを含む。 ** 東側諸国不参加
(資料)ウィキペディア(「日本選手団」2016.9.20)ほか

冬季オリンピックにおける日本のメダル数(金銀銅メダル)



(注)ガルミッシュ*は、ガルミッシュ・バルテンキルヘン。24年、46年は日本不参加
(資料)東京新聞2006.1.22、2010.3.2、ヤフー五輪サイトほか

図1 夏季・冬季オリンピックにおける日本のメダル数の推移

競技者を目指すまでのレジャー向けにできる限りかみ砕いて説明を加える。

2. スキー板の構造

スキー板を大きく分けると競技別に分かれており、滑走やスラローム等のアルペンスキー、モーグルやハーフパイプ等のフリースタイル、スキージャンプやクロスカントリー等、実に様々にある。図2には、スキージャンプ競技とクロスカントリー競技のスキー板を示す。スキージャンプ競技では空気抵抗を上げるために幅が広く、エッジが直線的なつくりになっており、一方クロスカントリー競技では雪上での抵抗を少なくするため幅が狭く、エッジを着けないものもある。クロスカントリー競技のスキー板はキャンバースキーと呼ばれスキー板のセンターが浮いて、トップとテールが地面に接し中央部が厚く前後の端が薄いアーチ型の形状をしている。キャンバー (camber) とは上反りの形状を意味する。斜面を滑走する他のスキー板材と異なりクロスカントリー競技のスキー板は雪を蹴って前に進む競技であるため軽量かつ滑走性に優れることが重要となる。スキー板材では、繊維強化プラスチック (FRP) 等のシート材を芯材として上下に積層した (サンドイッチ : SW) 構造が基本となり、全ての構成材がラミネート状態となっているためスキーのたわみに対して最も内部歪みの発生しにくい構造となる。このため、スキーの上

面に加わる力をそのままダイレクトに雪面に伝えることができる。図3には、クロスカントリー競技のスキー板材の断面構造の写真と模式図を示す。クロスカントリー競技に必要な軽量かつしなやかさと耐久性を併せ持ち滑走性にも優れた最速のレスポンスが可能な最強の構造となっている。

3. 滑走面⁶⁾

滑走面材料には、低温での材料安定性という観点からすべてある種のポリエチレン (PE) を使っており、低圧処理法を用いて製造されている。製造法としては、分子量 100 万分子量までは通常押し出し成形法、100 万分子量を超えるものは焼結法が用いられる。押し出し成形法とは、PE 原料を高温、高圧で溶かし、射出機によって板状に成形する製法である。焼結法とは、PE 原料を鑄型に入れて高温、高圧で溶かし円柱型ブロックを作る。そして、そのブロックを大根の桂剥きのように薄く削ってロールに巻き取っていく製法で、「シスタード」と呼ばれている。PE は、非均質材料で、非晶質材 (低密度) に囲まれた小粒の結晶 (高密度) から成っており、カーボンの黒い粒子を PE に混入 (5~20%) した滑走面はエレクトラ (グラファイト) と呼ばれ電気伝導効果が良く、汚れが付きにくい。そのため気温が高い時ほどその効果が発揮され春先によく使われる。PE 滑走面の滑走性は、密度と分子量に関係し、ここでは PE 滑走面の 1 種で IMS 社が販売している



図2 スキージャンプ競技とクロスカントリー競技のスキー板の外観と側面



図3 クロスカントリー競技のスキー板材の断面構造の写真と模式図⁵⁾

P-TEX™ を用いて表1にまとめる。表1に示すように分子量が大きい程、ワックス吸収性が良く、さらに耐磨耗性が良いほうが滑走性が良い⁷⁾。分子量と密度のバランスによって、ワックス吸収性、耐磨耗性が決まってくるが、現在では、分子量が大きく、密度0.94までP-TEX™ (エレクトラを除く)が、スキーの滑走面に最も適しているとされている。例えば、P-TEX™ で言えば4000と6000がこれに当たる。

次に、滑走面の研磨の有無による滑走性について、表面粗さ・撥水性・動摩擦係数をトピックに物質・材料研究機構で計測した結果を図4に示す⁸⁾。研磨を加えることで滑走面の表面粗さ(Ra: 約0.8←約1.9 μm)となり、撥水性(濡れ角: 約101°←約95°)も大きく向上する。結果として滑走性として重要な動摩擦係数(C.O.F: 約0.4←約0.7)が大きく改善する。

表1 PE滑走面の分類⁷⁾

	分子量	耐磨耗性	ワックス吸収	密度	製造方法
P-TEX™ N-100	20万	130 mm ³	1 mg/cm ²	0.955 g/cm ²	押出し成形
P-TEX™ Dura	30万	80 mm ³	1 mg/cm ²	0.960 g/cm ²	押出し成形
P-TEX™ 1000	50万	70 mm ³	2 mg/cm ²	0.952 g/cm ²	押出し成形
P-TEX™ 2000	350万	20 mm ³	6 mg/cm ²	0.937 g/cm ²	シンタード
P-TEX™ 2000 エレクトラ	350万	30 mm ³	5 mg/cm ²	0.990 g/cm ²	シンタード
P-TEX™ 4000	800万	15 mm ³	20 mg/cm ²	0.928 g/cm ²	シンタード
P-TEX™ 6000	600万	17 mm ³	12 mg/cm ²	0.932 g/cm ²	シンタード

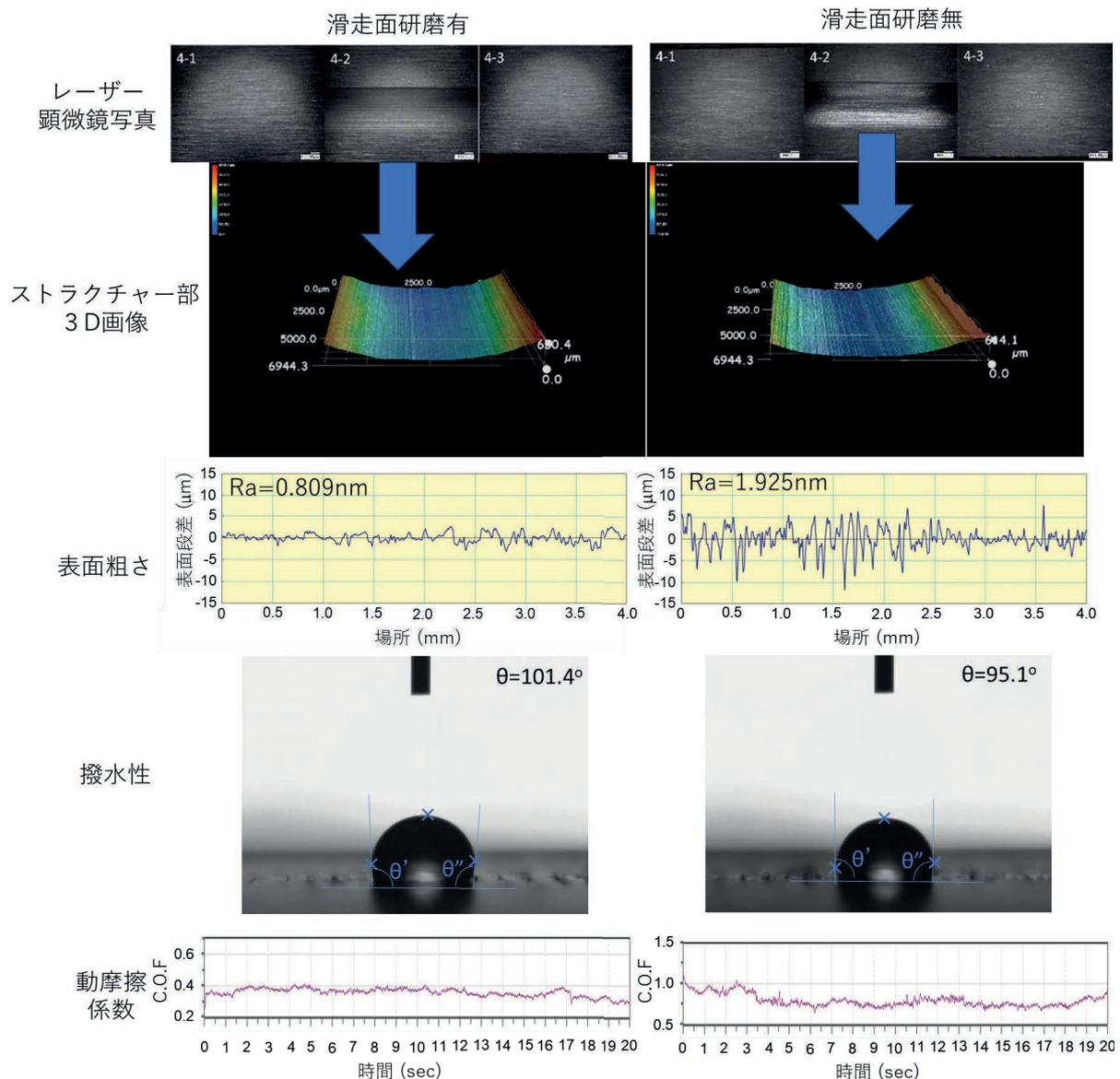


図4 滑走面の研磨の有無による表面粗さ・撥水性・動摩擦係数への影響⁸⁾

4. ワックス^{9),10)}

ワックス素材は炭素と水素から成る化合物(炭化水素)であるパラフィンワックスとも言われ炭素数 20 ~ 35 の広い範囲の分子の集合体である。またワックス素材は、滑走面に塗るベースワックスと雪面との滑走性を高めることを主眼した滑走ワックスに簡単に分類できる。滑走ワックスとベースワックスとの一番大きな違いは添加剤が加えられている事であり、この添加剤は多くは「フッ素」で、他にグラファイトと呼ばれる炭素化合物や、ガリウムなども販売されている。近年では、ナノ素材を添加剤として滑走性を向上させるワックスも開発されている。これらの添加物の役割は水弾きに作用したり、静電気に作用したり、また固形、液体、粉末、スプレーと様々なタイプが市販されている。ワックス素材は優れた滑走性を付与する製品および処理方法が開発されているが、多くのスキー競技者はしばしば競技中の滑走性能の経時劣化を指摘している。原因として、滑走過程でのワックスの摩耗であったり、雪質との不適切なワックス選択による雪面との摩擦増加、ワックスへの損傷であったり、雪中のゴミが滑走面に付着することによる雪面との摩擦増加、ワックスへの損傷等が考えられる。図5には、雪温に対する各種抵抗の模式図を示し、スキー板に発生する抵抗を以下の式(1)で表す¹¹⁾。

$$\mu_{total} = \mu_{dry} + \mu_{lub} + \mu_{cap} + \mu_{dirt} \dots\dots\dots (1)$$

- μ_{total} : スキー板に発生する全抵抗,
- μ_{dry} : 雪の粒が突き刺さる際の抵抗,
- μ_{lub} : 滑走面と雪の間に水分が介在する際の抵抗,
- μ_{cap} : 水分が大量に存在する際の抵抗(表面張力),
- μ_{dirt} : 油系の付着などによる抵抗

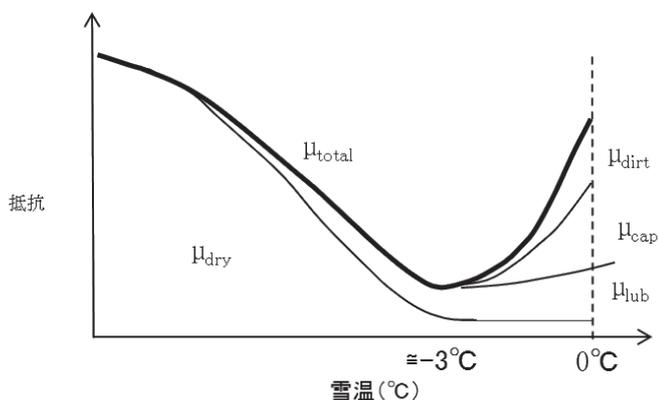


図5 雪温に対する各種抵抗の模式図

表2 雪質(湿度で見分け方が可能)と雪質に合わせたワックスの選択の例⁷⁾

雪の分類	見分け方	ワックス
乾いた雪	手に握っても形ができない	乾雪用(パラフィン系)
湿った雪	手に握ると形ができるが、水はたれない	湿雪用
水分の多い雪	手に握ると形ができ、水がにじみ出る	水分の多い雪用(高フッ素含有系)

つまり、約-3℃が一番各種抵抗を小さくし滑走性が良くなる。-3℃より高い雪温では滑走面と雪の間に水分や油分が存在し、-3℃より低い雪温では雪の粒が抵抗となり滑走性が低下する。そのため雪質、雪温とワックスの関係が非常に重要となってくる。また、雪温だけでなく雪質もワックス選択では重要なカギとなる。表2には、雪質(湿度で見分け方が可能)と雪質に合わせたワックスの選択の例を示す。

先述の通りワックス素材はベースワックスと滑走ワックスに分類され、ベースワックスは滑走面と滑走ワックスの間にあり、滑走性を高めることよりも「フッ素」を含む滑走性の高いワックスでは滑走面へのワックス吸着力が低いため、滑走面への吸着力を高める目的で「フッ素」を含まないパラフィンワックスが好まれる。高温で用いられる耐酸化コーティングや耐環境性コーティングでのボンドコートに役割は似ている。また、春先などの時期では付着物が少なくなるグラファイトワックス等も用いられる。ワックス塗布には持続性の高さからホットワックスというアイロンを用いた方法が主流となっている。ホットワックスにおいては、アイロン温度も重要で、アイロン温度が高いほどワックスの吸収が良い。90℃以上でワックス吸収が向上し、120℃以上ではワックス吸収は変わらない。また、ホットワックスは、時間も長いほどワックス吸収が良い。例えば融けたワックスが滑走面上にある時間を2倍にすると、吸収性は1.4倍になる。しかし、ある一定時間(約2分)以上は、効果は変わらないといわれている⁷⁾。ワックスマンのような熟練者であればワックスの厚みもスクレイパーすることで制御することは可能であるが、レジャーの場合は厚みよりも持続性を確保するためホットワックスで厚めに塗布しスクレイパーでワックスが薄いフィルム状に削れるようにだけでも効果的かもしれない。「フッ素」含有の滑走ワックスの場合、例えば図6に示すようにどのワックスが適しているかについては市販ワックスでも提案されており、雪質の湿度に応じて高フッ素(HF)か低フッ素(LF)含有かを選択し、同時に雪温に応じて(温度域で着色をしているため)グリーン、ブルー、バイオレット、ピンク等を選択することで理想的な-3℃の滑走性に近づくかもしれない。他のメーカーでも同様に着色して温度域を変えており、より低温の場合ワックス自体の硬度が高くなっている。一般的には春先などの雪温が高くなるほど雪質の湿度は高くなり、HF含有の滑走ワックスが好まれる。レジャー用途として、ワックスを塗ると「よく滑るとスピードが出るから怖い」、「スピードは出さないからあまり滑りすぎなくてもよい」という声はスキーやスノーボードの初心者によく聞こえるが、これは大きな間違いである。むしろワックスを塗らないことでスキー板に雪がくっついたり、滑らないことで逆に転倒する危険もあり、ワックスを塗ることはとても大切である。さらに

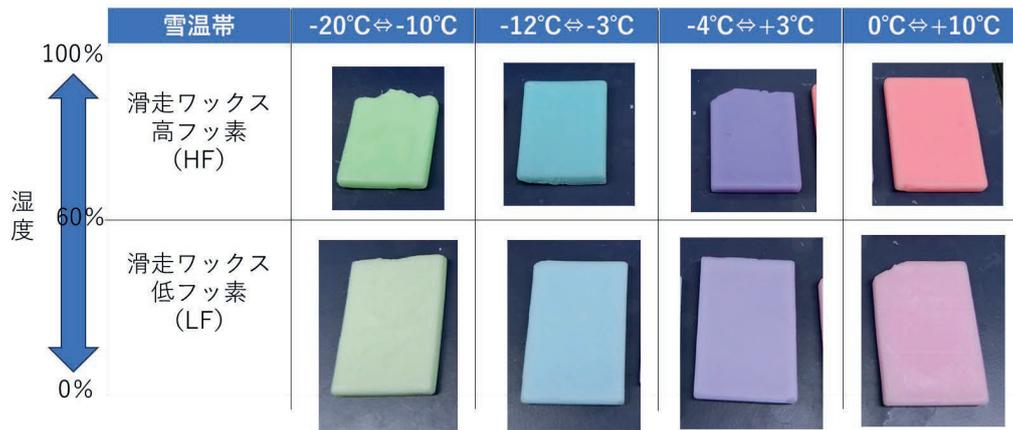


図6 市販ワックスの雪温及び雪質に応じた提案

滑走性(滑りやすさ)は、スキーやスノーボードの板に盛り込まれる性能要素の一つで非常に重要でもある。滑りの良さは、操作性にも繋がり事故防止や楽しみの質向上に貢献する。その際、自分でワックスをアレンジするのが「ワックスアップ」という作業になる。ホットワックスは、作業台等スペースの問題、アイロン温度の選択や塗り方、スクレイパー等、フッ素系界面活性剤(PFAS)の健康被害の問題などがあり、レジャー用途ではハードルは高くなるため、専門店で委託したり、手軽に液体ワックスやスプレーワックス等を活用して楽しむことも必要かもしれない。

5. おわりに

オリンピック・パラリンピック等の国際競技で勝負を決めるのはアスリートの努力(技量)が99%である。しかし、我々研究者が材料特性を引き出すことで、1秒を縮めたり、1m遠くに飛ぶことに貢献し、金銀を分ける最後の1%を後押しすることもあることも事実である。競技者の技量だけでなく、コーチング・コンディショニング・情報・道具用具開発・医学等の科学技術を駆使することで国際競技大会での好成績を収めることは日本を含め先進国では既に必要不可欠になってきており、HPSCの役割は益々大きくなるであろう。スポーツを楽しむということは、素晴らしい成績による競技者になることではなく、競技者に近づくことで楽しみを共有することかもしれない。そのため、本稿ではスキー競技に協力する過程で培ってきた滑走性を向上させるためのスキー板材と様々な雪とのインターラクションに関する知識・知見を、競技者を目指すまでのレジャー向けにできる限りかみ砕いて説明を加えた。単に滑走面、ワックスといっても多数あり、販売するメーカーも国内だけでなく国外を含めると選択肢は無

数にある。知識・知見はネット検索すれば簡単に得られるかもしれないが、得た知識・知見をどのように活かすかは自分次第であり、できるだけ自分でアレンジすることで楽しみの質を変化させ、大幅なパフォーマンス向上に繋げてほしいと願うばかりである。

謝 辞

クロスカントリースキーは株式会社小賀坂スキー製作所から提供されここにお礼申し上げます。

(Received March 12, 2024)

文 献

- 1) <https://www.jpnsport.go.jp/hpsc/about/organization/tabid/1104/Default.aspx>
- 2) <https://sports.go.jp/special/policy/suzuki-plan.html>
- 3) <https://sports.go.jp/tag/competition/post-79.html>
- 4) 物質・材料研究機構; 広報誌NIMS NOW, 21, (3), 9 (2021).
- 5) http://snow.gnavi.co.jp/ilovesnow/img/category/nordic_combined_tool.jpg
- 6) W. Nachbauer, P. Kaps, M. Hasler, M. Mössner; Friction between ski and snow, *The Engineering Approach to Winter Sports*, p. 17 (Springer, 2016).
- 7) <http://www.k-oa-k.co.jp/ysc/yuki.htm>
- 8) 下田一哉, 杉本敬子, 村上秀之; 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2016, 講演論文集(2016).
- 9) F. Breitschädel, N. Haaland, N. Espallargas; *Procedia Engineering*, 72, 267 (2016).
- 10) B. I. Freberg, R. Olsen, S. Thorud, M. Heresson, P. Molander; *Annals of Occupational Hygiene*, 57, (3), 286 (2013).
- 11) 対馬勝年; 氷雪のトライボロジー(富山大学, 2013).