



疑似液体膜はスケートの滑りを説明できるか (雪氷 71 巻, 5 号 369-375, 2009, 深沢倫子論文への補足)

富山大学理学部 対馬 勝年

雪氷 71 巻 5 号深沢 (2009) 論文は要旨および本文「はしがき」において「この“滑やすさ”の秘訣は、結晶表面の構造にある。」と記載している。近年、スケートの滑り機構を疑似液体膜によるとする主張が少なくないので、トライボロジーの見地から詳細を補足したい。

1. 氷の低摩擦機構の諸説

氷雪の滑りやすさを説明する学説には、圧力融解説 (Joly, 1886), 摩擦融解説 (Bowden and Hughes, 1939), 水蒸気潤滑説 (McConica, 1950), 水分子回転説 (Niven, 1959), 凝着説 (対馬, 1976) などがある。

このうち摩擦融解説を支持する実験や理論解析が数多く発表された。Ambach and Mayr (1981) は滑走するスキーの底面に発生する水膜厚さを計測, Colbeck *et al.* (1997) はスケートに埋め込んだ熱電対で滑走面の温度上昇を計測した。接触面に溶け水が介在すれば、付着力が激減し、滑りが良くなると推論された。熱を基本にした理論研究も進み、摩擦融解説が多くの研究者に支持されたのは衆知の事実である。

2. 摩擦融解説への疑問と凝着説

藤岡 (1962, 1963) は鉄に比べ熱伝導の悪いアクリル (PMMA) の摩擦が温度、速度の広い範囲で一貫して大きい値を得た。材質を変えると、溶け水の証拠となるつらは摩擦が大きい滑走面で発生した。−20℃の低温でアクリルが雪面に強く凍りついた経験などから低温癒着説を考えた。藤岡 (1958) の着想はその後の凝着説の先がけであった。対馬 (1976) は氷の剪断強さ S がブリネ

ル硬さ P に比べ著しく小さいことに着目し、凝着説によっても 0.01 程度の低摩擦係数が導かれることに気づき、特殊な潤滑膜を仮定しなくてもスキー・スケートの滑りを説明できることを示唆した [−10℃で氷の P は 10MPa (Butkovich, 1954a), S は 0.1 MPa (Butkovich, 1954b) なので、摩擦係数は $\mu = S/P = 0.01$ と近似される]。対馬 (1977) は単結晶氷に鋼球を滑らせ、融解水の介在しない低速度でも摩擦が依然として小さいこと、氷の結晶面による摩擦の異方性、柱面上の滑走方向による摩擦の異方性などを検出し凝着説によって説明した。これらの結果は従来の学説では説明できないとした (対馬, 2006)。後に、摩擦融解説の論理的矛盾も指摘された (対馬・木内, 1998)。

3. Jellinek による剪断付着力の測定と疑似液体膜による説明

Jellinek (1967) は剪断による氷の付着力を−4.5℃の温度で測定し、鏡面状ステンレスやオプチカルフラットの石英に対し氷は密着したまま滑ることを見出した。剪断速度 (0.005~0.4 mm/s) を速くすると付着力は直線的に増大し、粘性抵抗の特徴を得た。疑似液体膜の粘性係数がそれぞれの面に対して推定された。(Jellinek は疑似液体膜を 0.1~0.01 μm と厚く仮定した。この背景には粘性係数を大きくしたいという意図が感じられる。) しかし、通常の機械仕上げ面では粘性が認められなかった。

4. 疑似液体膜の氷の低摩擦への適用

ところで、問題の疑似液体膜を氷雪の滑りやすさに関係づけたのは、Weyl (1951) が氷の表面構

造の論文の中で補足的に述べたのが発端と思われる。吉田 (1971) も著書 (NHK ブックス) の中でスキーやスケートの滑りについては諸説があってよくわからない、そのうち疑似液体膜で説明する学説が出るかも知れないと Weyl と同じ示唆をしている。Koning *et al.* (1992) は氷を押す垂直力と摩擦抵抗を測定する特殊なスケートを用い、速度 (4.5~10 m/s) と温度を変えて摩擦抵抗を測定した。−4.6°C の温度で摩擦係数 (0.004~0.006) は速度の増大とともに直線的に増大する結果を得た。これは粘性抵抗の特徴であり、摩擦融解説では逆に摩擦が減少するはずであるとし、Jellinek (1967) の剪断付着力の研究を引用して、疑似液体膜潤滑説を支持した。最近では Scientific American (日本版) でウェットラウファー・ダッシュ (2000) が氷表面の疑似液体膜がスケートの滑りを説明すると主張している。その理由に氷表面層は固体内部と異なり、分子間の結合が弱いことを挙げている。Rosenbarg (2005) も氷表面の解説の中で疑似液体膜が氷雪の滑りやすさを説明すると主張している。この解説は氷の表面構造を詳しく扱っているが、肝心のところでは氷雪の摩擦の諸特性の考慮もなく、氷の摩擦係数値の説明もない。その意味では Weyl や吉田の主張と変わらない。

5. 疑似液体膜潤滑説への疑問

筆者が主張したいのは未だかつて氷の摩擦特性も摩擦係数の値も疑似液体膜によっては説明されたことがないという事実である。水潤滑に比べ潤滑膜が桁違いに薄く、粘性は逆に大きい疑似液体膜で実測の摩擦係数を説明できるか疑問がある。他にも、疑似液体膜では同一氷結晶面上での摩擦の異方性 (対馬, 1977, 1978) の説明が難しいであろう。また、スピードスケートの動摩擦係数 0.004 程度 (小林ら, 1970; Koning *et al.*, 1992; 対馬ら, 2000) の数値を疑似液体膜説で説明できるのかも疑問である。

スケートが滑った氷リンクには目に確認されるほどの明瞭な滑走痕が刻まれ、滑りは剪断の他に氷の掘り起こし、再結晶化、クラック形成など疑似液体層より遙かに厚い氷の表面層が関与する。氷と各種球面の摩擦の場合、摩擦痕には塑性変形の跡や再結晶化、マイクロクラック、摩耗粉 (氷

の屑) などが観察され (対馬, 1980)、氷の摩擦が表面の薄い分子層内の問題だけではなく、母体の氷の深いところまで関与した現象であることが示されている。凝着説はこれらの摩擦を説明する学説として提案されている。

以上トライボロジーの立場から氷上のスケートの滑りについて補足した。深沢論文は他の固体に密着した氷界面の疑似液体膜について厚さ、接触角、粘性係数の温度特性など数多くの未知の問題があることに改めて気づかせた。

文 献

- Ambach, W. and Mayr, B., 1981 : Ski gliding and water film. Cold Region Science and Technology, **5**, 59-65.
- Bowden, F.P. and Hughes, T.P., 1939 : The mechanism of sliding on ice and snow. Proc. Roy. Soc. (London), **172**, 280-298.
- Butkovich, T.R., 1954a : Hardness of single ice crystals. SIPRE Res. Paper **9**, 1-12.
- Butkovich, T.R., 1954b : Ultimate strength of ice. SIPRE Res. Rep., **9**, 12pp.
- Colbeck, S.C., Najarian, L. and Smith, H.B., 1997 : Sliding temperature of ice skates. Amer. J. Phys. **65**, 488-492.
- 深沢倫子, 2009 : 氷表面の構造とダイナミクス. 雪氷, **71**, 369-375.
- 藤岡敏夫, 1958 : 雪橇の抵抗IV. 低温科学, 物理篇, **17**, 31-51.
- 藤岡敏夫, 1962 : 雪橇の抵抗V. 低温科学, 物理篇, **20**, 159-179.
- 藤岡敏夫, 1963 : 雪橇の抵抗VI. 低温科学, 物理篇, **21**, 31-44.
- Jellinek, H.H.G., 1967 : Liquid-like (Transition) layer on ice. J. Colloid and Interface Scie. **26**, 192-205. (雪氷, 1968 : **30** (5), 131-141 に黒岩大助の解説あり)
- Joly, J. 1886 : The phenomena of skating and professor J. Thomson's thermodynamic relation. Scie. Proc. Roy. Dublin Soc. N.S., **5**, 453-454.
- 小林慎作・中尾正義・北原武道・進士康信, 1970 : テストスケートによる氷の動摩擦係数の測定. 低温科学, 物理篇 **28**, 243-259.
- Koning, J.J. de, Groot, G. de and Ingen Schenau, G.J. van, 1992 : Ice friction during speed skating. J. Biomechanics, **25** (6), 565-571.
- McConica, T.H., 1950 : Sliding on ice and snow. Report to the Research and Development Branch, Office of the Quartermaster General U.S. Army,

- American Ski Company.
- Niven, C.D., 1959: A proposed mechanism for ice friction. *Can. J. Phys.* **37**, 247-255.
- Rosenbarg, R., 2005: Why is ice slippery? *Physics Today*, Dec. 50-55.
- 対馬勝年, 1976: 氷の摩擦機構について. *潤滑*, **21**, 287-294.
- 対馬勝年, 1977: 単結晶氷の摩擦に関する研究 I ~ III. *低温科学, 物理篇* **35**, 1-46.
- 対馬勝年, 1978: 単結晶氷の摩擦 III. *潤滑*, **23**, 728-733.
- 対馬勝年, 1980: プラスチック球と単結晶氷の摩擦. *潤滑*, **25**, 450-457.
- 対馬勝年, 2006: スケートはなぜ軽快によく滑るのですか. *雪氷*, **68**, 218-220.
- 対馬勝年・木内敏裕, 1998: 高速スケートリンクの開発. *雪氷*, **60**, 349-356.
- 対馬勝年・結城匡啓・木内敏裕・下平昌兵, 2000: 氷結晶面コントロールによる高速スケートリンクの開発. *トライボロジスト*, **45**, 72-78.
- ウェットラウファー, J.S.・ダッシュ, J.G., 2000: 氷表面の謎を解く. *日経サイエンス*, 4月号, 52-55. (編集部訳, 監修古川義純)
- Weyl, W.A., 1951: Surface structure of water and some its physical and chemical manifestation. *J. Colloid Scie.*, **6**, 389-405.
- 吉田順五, 1971: 雪の科学. *NHK ブックス* **136**, 158-176.

(2009 年 11 月 5 日受付)

市民科学活動と研究者との橋渡し

河村 俊行

1. はじめに

猪苗代湖で毎年のように観察される「しぶき氷」と「団子氷」に関する論文が *Journal of Glaciology* の最新号 (Vol. 55, No. 193) に掲載されました (Kawamura *et al.*, 2009). この研究は、樋口敬二氏が提唱される「市民科学活動と研究者との橋渡しに学会が果たす役割」(樋口 2006b) の好例と思われますので、その研究の経緯と結果の概要を想い出話とともに書かせていただきます。

<「しぶき氷」は岸に降り注いだ波のしぶきが凍結したもので>, 木々に凍着して巨大なモンスターのような形状となる。なお、東海林 (1982) は屈斜路湖での小規模な同様の氷を写真に収めている。一方、<「団子氷」は「大きなものはラグビーボール大で、小さなものはテニスボール大、これが全部、球に近い」真ん丸な氷で、それが湖面を覆いつくして漂い、岸边に打ち上げられる> (樋口, 2006b) ものである。

2. 研究のきっかけ

2006 年 4 号の新刊紹介で、樋口氏が写真集「しぶき氷-猪苗代湖・不思議な氷の世界」(小荒井, 2006) を取り上げ、特に“Interesting な現象”として「団子氷」を紹介していた。その中で「市民

科学活動と研究者の橋渡しの役目を果たすのが、日本雪氷学会のひとつの使命ではないか」と提唱し、この本の紹介の目的を「市民が発見した雪氷現象を研究者に知っていただき、現象解明の端緒としたいと考えた」と述べられた。さらに<本書によって一人でも多くの会員が「結氷と降雪」という雪氷相互作用に関心を深め、研究が進むことを期待している>と記していた。

私はこの記述を、<「結氷と降雪」という雪氷相互作用>を研究する関係者への問いかけ(挑発?)と受け取った。そのころ私は専門研究分野の 1 つを、流行の“相互作用”という言葉を入れた「雪氷相互作用」としていたので、まさに私が指名されたとも捉えた。さらに最近の若い人は“Important な研究”に忙しく、私は定年を近くに控え、“Interesting な研究”が可能な立場にあったので、私がやらなきゃ誰がやる…(やらざるをえない)と思った次第です。なお「Important な研究と Interesting な研究」については、樋口 (2006a) を参照してください。

3. 観測

早速同書を購入し、その見事な写真に感動した。そこで著者である小荒井実氏に連絡を取り、