

氷の表面はなぜ濡れるのか？

村田憲一郎 〈北海道大学低温科学研究所 murata@lowtem.hokudai.ac.jp〉

佐崎元 〈北海道大学低温科学研究所 sazaki@lowtem.hokudai.ac.jp〉

雪国に住む人でなくとも、一度はスキーやスケートを楽しんだり、雪だるまやかまくらを作って遊んだ経験があるだろう。また、凍った道を歩くときやアイスバーンで車を運転するときは、滑らぬように大変気を遣う。ちなみに、私たちが雪玉を作れるのは、氷の表面が濡れていることによる毛管接着のおかげである。このように私たちは日常の様々な経験を通して、「氷点下でも氷の表面は濡れている」ことを実感している。

現在、氷の表面融解として知られるこの現象の研究の歴史は思いのほか古く、電磁気学の祖として名高いマイケル＝ファラデーの英国王立研究所での金曜講話（1850年）にまで遡るといわれている。以来、多くの研究者がこの現象に魅せられ、その解明に力を注いできたが、氷上で凍らない水膜—バルク水と区別して擬似液体層と呼ばれる—が発生するメカニズムは、今なお十分に理解されていない。この層の厚さは数ナノメートル程度と極めて薄く、擬似液体層を直接捉え、かつ精度よく測定することが極めて難しいのである。実は、その存在をはじめて実証できたのでさえ1980年代—ファラデーによる考察から一世紀以上を経た後のことであった。

我々はこの難題に対し、レーザー共焦点微分干渉顕微鏡と呼ばれる独自の光学顕微鏡システムを開発し、厚さ10 nmに満たない氷上の擬似液体層を、その表面揺らぎに至るまで直接可視化することに成功した。すると「百聞は一見に如かず」の格言の通り、従来の表面融解のシナリオでは想定されてこなかった擬似液体層の新たな性質が見えてきた。

これまで「擬似液体層は均一かつ完全に

氷の上を濡らしている」と考えられてきたが、実際は温度と水蒸気圧に応じてその濡れ状態を変化させており、氷表面を平衡状態に近づけると、擬似液体層は濡れ転移により自発的に撥水する、つまり平衡状態では擬似液体層は薄膜として氷を完全に濡らすことができず、結露の如く液滴状になることが明らかになった。その結果、融点近傍であっても系全体の表面自由エネルギーは押し上げられ、擬似液体層は熱平衡下では安定に存在できずに蒸発してしまい、氷表面は乾いてしまうのである。

その一方で、氷表面がある一定の氷の成長条件もしくは昇華条件を満たしたときのみ、擬似液体層が生成されることが明らかになった。この結果は、擬似液体層が水蒸気から氷へと相転移する過程（もしくはその逆）で過渡的に生み出される中間相であることを強く示唆する。この擬似液体層の相挙動は、表面融解を字義通りにバルクの融解の前駆現象として捉える伝統的立場とは相反するものであり、本研究は長年の謎であった氷の表面融解を引き起こす新しいメカニズムを解き明かすものといえる。

氷は水とともに地球上にあまねく存在しており、氷が主役になる自然現象は枚挙に暇がない。特に氷の表面融解は、我々に身近な雪玉作りや氷上の潤滑以外にも、凍結によって地面が隆起する凍上現象、雪の形態変化、氷河の流動、オゾンホール生成プロセス、雷雲での電気の発生機構など、地球寒冷圏での様々な自然現象に関与しているといわれている。本研究により氷の表面融解のメカニズムの一端が明らかになったことで、これらの自然現象の基礎的理解がより深まることが期待される。

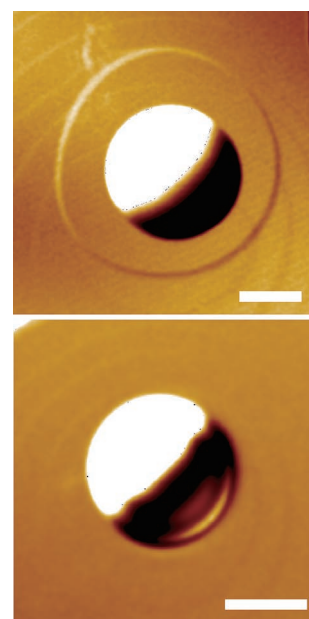
—Keywords—

擬似液体層：

表面融解により生じた氷表面を覆う極薄の水膜を指す。この水膜はバルク水とは異なる（より氷に近い）性質を持つことから、「擬似液体層」と呼ばれている。

濡れ転移：

表面自由エネルギーにより支配される相転移現象であり、濡れ形態の変化をもたらす。氷上の擬似液体層はこの濡れ転移を介して、部分濡れと準不完全濡れの二種類の濡れ形態（下図）を示す。



氷上の擬似液体層が示す二種類の濡れ形態。(上)準不完全濡れ。(下)部分濡れ。スケールバーは20 μm。