



Title	高分解能光学顕微鏡と原子間力顕微鏡による擬似液体層観察
Author(s)	長嶋, 剣; 宮戸, 祐治; 阿部, 真之 他
Citation	低温科学, 84, 67-73
Issue Date	2026-03-10
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.84.67
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99018
Type	departmental bulletin paper
File Information	07_p067-073_LT84.pdf



高分解能光学顕微鏡と原子間力顕微鏡による 擬似液体層観察

長嶋 剣^{1)*}, 宮戸 祐治²⁾, 阿部 真之³⁾, 村田 憲一郎¹⁾, 佐崎 元¹⁾

2025 年 10 月 9 日受付, 2025 年 11 月 18 日受理

氷表面の擬似液体層 (QLLs) はその物理的性質を巡り長年論争が続いている。本稿では、高分解能光学顕微鏡 (LCM-DIM) と原子間力顕微鏡 (AFM) という、QLLs に対する2つのアプローチを紹介する。LCM-DIMは、QLLsが -2°C 以上の非平衡下で不均一な部分濡れや準不完全濡れの形態をとることを明らかにした。一方、従来法の課題を克服した周波数変調方式AFM (FM-AFM) は、 -24°C でも約25 nmの厚いQLLsを検出した。この一見矛盾する結果を考察し、QLLsの統一的な理解には両手法の相補的な活用が不可欠であることを論じる。

Investigation of Quasi-Liquid Layers by Advanced Optical Microscopy and Atomic Force Microscopy

Ken Nagashima^{1*}, Yuji Miyato², Masayuki Abe³, Ken-ichiro Murata¹, and Gen Sazaki¹

The physical properties of the quasi-liquid layers (QLLs) on ice surfaces have been a subject of long-standing debate. This review compares two approaches to studying QLLs: advanced optical microscopy (LCM-DIM) and atomic force microscopy (AFM). LCM-DIM revealed that QLLs adopt non-uniform, partially wetted morphologies under non-equilibrium conditions above -2°C . In contrast, frequency-modulation AFM (FM-AFM), which overcomes the challenges of conventional methods, detected a thick (~ 25 nm) QLL even at -24°C . We discuss these seemingly contradictory results and conclude that a complementary use of both techniques is essential for a unified understanding of QLLs.

キーワード：氷, 擬似液体層, 高分解能光学顕微鏡, 原子間力顕微鏡

Ice, Quasi-liquid layers, advanced optical microscopy, atomic force microscopy

1. はじめに

固体である氷がその融点以下の温度で、表面を薄い液体様の層で覆われる「表面融解」という現象は、19世紀に電磁気学の祖マイケル・ファラデーによって初めて指摘された、物質科学における最も根源的かつ魅力的なテーマの一つである (Faraday, 1859)。この現象によって氷表面に現れる層

は「擬似液体層 (Quasi-Liquid Layers: QLLs)」と呼ばれ、雪の形態変化や氷の滑りやすさ、さらには雷雲の帯電機構や凍上現象といった、我々の身の回りの多岐にわたる自然現象を理解する上で不可欠な存在であると考えられている (Li & Somorjai, 2007; Slater & Michaelides, 2019; 古川, 2009)。ファラデーによる先駆的な考察から一世紀以上が経過し、その存在を実験的に検証する現代的な研究が始まった。そ

連絡先

長嶋 剣

北海道大学低温科学研究所

〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目

Tel: 011-706-6881

Email: nagasima@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Japan

2) 龍谷大学先端理工学部

Faculty of Advanced Science and Technology, Ryukoku University, Japan

3) 大阪大学大学院基礎工学研究科附属極限科学センター

Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Japan

の先駆けとなったのが、1980年代の北海道大学低温科学研究所におけるエリプソメトリー (Furukawa et al., 1987) や X線回折 (Kouchi et al., 1987) を用いたQLLsの直接検出である。これらの研究を皮切りに、その後も様々な実験手法によってQLLsの存在は確固たるものとなり、今日の活発な研究分野の礎が築かれた。しかしながら、その物理的性質、とりわけ最も基本的なQLLsの厚みでさえ報告値が大きく異なり、長らく統一的な見解が得られていなかった(図1)。

この膠着した状況の中、我々のグループが開発した高分解能光学顕微鏡を用いた研究は、QLLsがこれまで考えられていたような静的で均一な膜(完全濡れ)ではなく、水蒸気圧などの環境条件に応答してダイナミックに振る舞う、不均一な液滴状あるいは薄膜状の構造体(部分濡れ/準不完全濡れ)であることを初めて明らかにした (Murata et al., 2016; Sazaki et al., 2012; 佐崎元 et al., 2014)。この発見は、QLLsの真の姿を解明するためには、nmオーダーの垂直分解能のみならず、その複雑な形態を捉えるための高い水平分解能を両立した観察手法が不可欠であることを明確に示している。

本稿では、まずQLLsの描像を塗り替えた光学顕微鏡による観察成果を紹介する。次いで、高い空間分解能を持つ原子間力顕微鏡 (AFM) によるQLLs計測を取り上げ、従来の実験手法が抱えていた測定上の課題を指摘するとともに、それらを克服しうる最も高感度な手法の一つである周波数変調方式AFM (FM-AFM) による我々の研究成果を解説する。最後に、両者の特徴を比較検討することで、QLLsの包括的な理解に向けた現代的な描像を提示することを目的とする。

2. 高分解能光学顕微鏡による擬似液体層観察

長年にわたり、QLLsの存在は間接的な手法で示唆されてきたものの、その動的な振る舞いや空間的な不均一性を直接捉えることは困難であった。著者の所属する北海道大学低温科学研究所の相転移ダイナミクス研究室では、一貫して氷の結晶成長現象、特にその場観察を重視した研究を展開してきた。その中で独自に開発・改良を進めてきたのが、極めて高い垂直分解能 (オングストロームオーダー) を誇るレーザー共焦点微分干渉顕微鏡 (LCM-DIM) である。本装置を用いて、佐崎らは2010年に氷の気相成長における基本単位である単位ステップ (高さ約0.4 nm) の可視化に成功し (Sazaki et al., 2010)、2012年にはQLLsのその場観察にも成功した (Sazaki et al., 2012; 佐崎元 et al., 2014)。

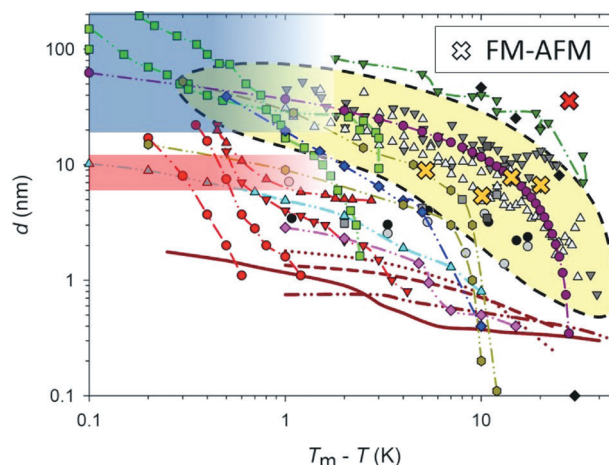


図1: 擬似液体層(QLLs)の厚み(d)の過冷却($T_m - T$)依存性。この図はGelman Constantin et al. (2018) の図を修正したものである。観察手法と形態に基づきQLLsを分類するため、着色した領域を追加した。青の領域(i)と赤の領域(ii)は、それぞれ高分解能光学顕微鏡 (LCM-DIM) によって明らかにされた、液滴状および薄膜状QLLsの厚みに対応する (Murata et al., 2016; 村田 & 佐崎, 2017)。液滴状QLLsについては、QLLsの場所によって高さが異なるため中心部での最大高さを示している。AFMによって報告されたQLLsの厚みは様々な形をした灰色のシンボルで示してあり、黄色の領域(iii)はAFMによって得られた厚みの大まかな範囲を示している。赤色と橙色の×印はFM-AFMによって得られたデータを示している (Miyato et al., 2019)。その他の記号は、様々な計測手法および理論研究によるQLLsの厚みが示されている。詳細な凡例については、原著であるGelman Constantin et al. (2018) を参照されたい。

Figure 1: Summary of quasi-liquid layer (QLLs) thickness (d) as a function of undercooling ($T_m - T$). The figure is adapted and modified from Gelman Constantin et al. (2018). The colored regions have been added to classify the QLLs based on observation technique and morphology. Regions (i) (blue) and (ii) (red) correspond to the thicknesses of droplet-type and thin-film type QLLs, respectively, as revealed by advanced optical microscopy (LCM-DIM) (Murata et al., 2016; 村田&佐崎, 2017). For the droplet-type QLLs, the plotted value represents the maximum height at the center. The yellow region (iii) broadly encompasses the range of thicknesses reported by AFM, with the individual data points from these studies shown as gray symbols. The red and orange 'X' symbols represent recent measurements obtained by FM-AFM (Miyato et al., 2019). All other symbols represent a collection of historical data from numerous experimental and theoretical studies; for a detailed legend, see the original publication by Gelman Constantin et al. (2018).

図2に、LCM-DIMによって可視化された氷ベール面上のQLLsの典型的な像を示す(温度-0.1℃)。微分干渉効果により高さが陰影として強調され、左上から照明した像のようになっており、画像右半分には多数見られる直径10 μm サイズの円は周囲より盛り上がった突起であることがわかる。光干渉法による定量的な高さ計測から、これらの突起の高さは直径の約1/100に相当する100 nm程度と見積もられた (Murata et al., 2016)。これらの突起同士は合体して一つのより大きな突起へと成長する挙動が観察される

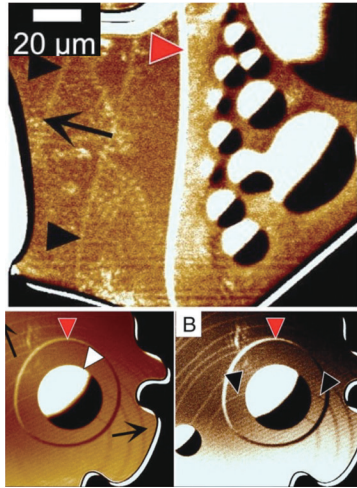


図2：氷ベースル面上の準不完全濡れをしたQLLsの直接観察。上段はLCM-DIM像，下段はその模式図を示す。LCM-DIM像は薄膜状のQLLs（赤三角）の上に液滴状のQLLsが乗った「目玉焼き」型の構造であることを示している。QLLsの近傍には水の単位ステップ（黒三角）が見られ，黒矢印方向へと成長している。このことは，氷表面が融点以下の環境にあることを示す。図はSazaki et al. (2012) より引用した。Copyright (2012) National Academy of Sciences.

Figure 2: Direct visualization of quasi-incomplete wetting by QLLs on an ice basal face. The upper panel shows an in-situ LCM-DIM image, while the lower panel provides a schematic interpretation of the observed features. The image reveals a "fried egg" like structure, where droplet-type QLLs (α -QLLs) are formed on top of a continuous thin-film type QLLs (β -QLLs, indicated by the red triangle). The presence of a growing elementary step (black arrow and black triangles) near the QLLs confirms that the observation was made during vapor growth below the melting point. From Sazaki et al. (2012). Copyright (2012) National Academy of Sciences.

ため，この物体は液体層であることを明確に示している。

さらに，これらの液体層が単なるバルク氷の融解によって生じたものではなく，氷の表面融解に由来するQLLsであることを示す決定的な証拠も得られた。図2の黒矢印で示されるように，QLLsのすぐそばで氷の単位ステップが気相成長を続けている様子が確認され，加えてQLLsの内部でステップが前進する様子も捉えられた（Murata et al., 2019）。よって，氷表面は融解条件ではなく成長条件であり，QLLsは下地の氷結晶と共存する特異な中間相であることを裏付けている。

これらの直接観察がもたらした最も重要な知見は，QLLsがこれまで考えられてきたような氷表面全体を均一に覆う完全濡れの状態ではなく，不均一な構造を持つ部分濡れの状態であるという発見であった。この事実は，QLLsの真の姿を捉えるためには，その複雑な形態を認識しうる高い水平分解能が不可欠であることを示唆している。我々の光学顕微鏡観察によって明らかになったQLLs

の性質は，主に以下の二点に集約される。

I. 出現条件 — 非平衡下でのみ現れる過渡的な中間相:

光学顕微鏡で観察される厚みを持ったQLLsは，約 -2°C 以上の温度域で，かつ水蒸気圧が平衡圧からずれた非平衡条件下（過飽和または未飽和）においてのみ出現する。すなわち，氷の気相成長や昇華といった相転移が進行している最中にのみ過渡的に生成される中間相であり，平衡状態に近づくときと消滅することが確認されている（Asakawa et al., 2016; Murata et al., 2016; 村田 & 佐崎, 2017）。なお，QLLsの出現に必要な湿度は -0.5°C で約104%以上， -2.0°C では約108%以上と見積もられている（Asakawa et al., 2016）。

II. 形態 — 準不完全濡れ構造:

QLLには前述の突起型の他に，厚み10 nm程度の薄い膜状の形態も存在する。図2の赤矢印で示されるのがこの薄膜状の液体層であり，その上に突起型のQLLsが乗ることで，特徴的な目玉焼き型の構造が見られている。この形状は準不完全濡れとして知られ，氷と液膜を介した気相との間に働くファンデルワールス力によってその安定性が理論的に説明できる（Murata et al., 2016; 村田 & 佐崎, 2017）。

3. 原子間力顕微鏡によるQLLsの観察

3.1 従来AFM法による測定と厚いQLLs

AFMは，オングストロームオーダーの高い垂直・水平分解能を持つことから，QLLsの厚みを直接測定する有力な手法として1990年代から期待されてきた。これまで主としては，探針を水平に走査して摩擦力を測定しQLLsの存在を示唆する試みや（Bluhm & Salmeron, 1999），探針を氷表面に垂直に接近させて得られるフォースカーブを解析し，その厚みを定量化する試みがなされた。

特に厚み測定では，後者のフォースカーブ解析が主に用いられた。この測定では，探針が表面に接近すると，探針と氷表面の間に形成されるメニスカス力を主とする引力によって急激に氷表面に引き寄せられる飛び込み（jump-to-contact）という現象が観測される。多くの研究では，このjump-to-contactが開始する位置をQLLsの気液界面，斥力を検知する位置をQLLs-氷界面とみなし，その差をQLLsの厚みと解釈していた。この手法により，例えば -20°C といった低温においても10 nmに達する非常に厚いQLLsの存在が報告されている（Döppenschmidt & Butt, 2000）。これらのAFMによる測定値は，他の実験手法やシミュレーションによる予測値よりも大きな値を示す傾向

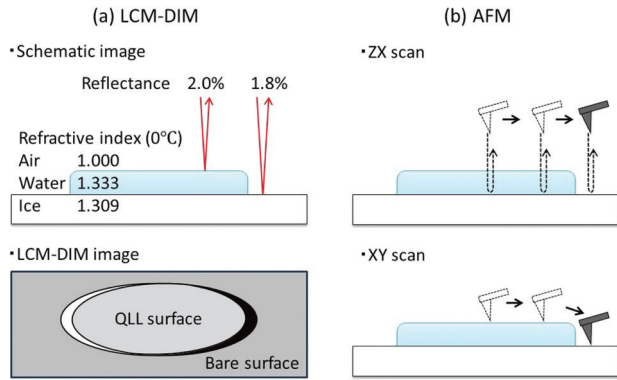


図4：QLLs検出手法の比較。(a) 高分解能光学顕微鏡 (LCM-DIM) は、微分干渉効果によって部分濡れしたQLLsのエッジを強調した像を得る。一方、エッジを持たず均一に完全濡れをしたQLLs層が存在した場合、わずかな反射率のコントラストで判別する必要があるため困難であると予想される。(b) 原子間力顕微鏡 (AFM) は、フォースカーブ (Z (x) スキャン) によって QLLs の厚みを定量的に計測できるが、柔らかい気液界面からのフィードバックを得てXYスキャンすることは困難である。

Figure 4: Comparison of detection methods for QLLs. (a) Advanced optical microscopy (LCM-DIM) excels at observing the morphology of partially wetted QLLs by enhancing their edges through its differential interference effect, while it struggles to detect uniform, completely wetted layers. (b) Atomic Force Microscopy (AFM) can quantitatively measure QLL thickness via force-distance curves (ZX scans), but struggles to image the overall 3D morphology (XY scans) due to the difficulty of stably tracking the soft air-QLL interface.

導入する窒素ガスの湿度と温度を二段階で制御する。インキュベーター内の温度では湿度を100%未満に保ち不要な着霜を防ぎつつ、試料ステージ上のペルチェ素子でさらに冷却することで、ステージ上でのみ過飽和状態を作り出し、氷の気相成長を誘起する仕組みである。

この装置を用い、 -24°C の非平衡条件下 (湿度380%) で氷表面のフォースカーブを測定したところ、探針が固体の水界面に到達するずっと手前から、液体層との相互作用を示唆する明確な引力が検出された。このフォースカーブを詳細に解析し、メニスカスが形成され始める点から固体の水界面 (フォースカーブの極小値) までの距離をQLLsの厚みと定義すると、その値は約25 nmと見積もられた (図1赤×印)。さらに、平衡近傍条件下 (湿度105%前後) においても $-20 \sim -5^{\circ}\text{C}$ の範囲内において5 ~ 20 nm程度の厚みを持ったQLLsが検出された (図1橙色×印)。これは、Gelman Constantinらが同様の平衡近傍条件 (平衡近傍、 $-7^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$) で1 nm未満と報告した結果と、明確に異なるものである。

一方、光学顕微法では -2°C 以上の非平衡条件でしか QLLs が観察されなかったため、FM-AFM計測の結果とは

大きく異なる。この矛盾を合理的に説明するには、現時点で2つの可能性が考えられる。

第一は、QLLsの形態変化である。低温においてQLLsが均一な完全濡れに近い膜として存在していた場合、QLLsのエッジをコントラスト源とする光学顕微鏡では認識が困難であった、という可能性である (図4a)。しかし、我々は -20°C 以下の低温でも光学顕微鏡によって氷の単位ステップを観察し、その成長が水蒸気量に鋭敏に依存することを確かめている (Inomata et al., 2018)。もし単位ステップが厚い液体層に埋もれているなら、その成長速度は液体層の温度に依存するはずであり、液体層の外側の水蒸気量に直接依存するとは考えにくい。したがって、この仮説では観測事実を説明できない。

第二の可能性は、QLLsのサイズが光学顕微鏡の検出限界を下回るという問題である。すなわち、QLLsが低温でも部分濡れの液膜として存在するものの、その個々のサイズが光学顕微鏡の水平分解能 (数百nm) を下回るため、認識できなかったという仮説である。実際、本稿で紹介したFM-AFM研究においてもQLLsが全く存在しない領域が確認されており、QLLsが巨視的なスケールで氷表面全体を一様に覆っているわけではないことが示唆されている。さらに、Bluhm and Salmeron (1999) は、対象こそ薄膜水 (高さ ~ 1 nm) ではあるものの、AFMを用いて -30°C という低温で部分濡れ構造を報告しており、そのサイズは光学顕微鏡の水平分解能以下のものであった。

これら複数の仮説を検証し、低温域におけるQLLsの真の姿を解明することが、今後の重要な課題となるだろう。

4. 考察と今後の課題

本稿では、氷の擬似液体層 (QLLs) 研究に対し、形態の観察を担う高分解能光学顕微鏡 (LCM-DIM) と、厚みの定量的計測を担う原子間力顕微鏡 (AFM) という、2つの相補的なアプローチを紹介した。LCM-DIMは、QLLsが部分濡れという不均一な形態をとることを初めて視覚的に明らかにした。一方のAFMは、従来法では圧力融解やjump-to-contactといったアーティファクトの問題が長らく付きまとっていたものの、近年の技術的進展、特に本稿で詳述した周波数変調方式AFM (FM-AFM) の登場により、その様相は一変した。探針-水間の相互作用を引力で測定することで圧力融解を避け、大きなバネ定数を持つ探針でjump-to-contactを原理的に回避したFM-AFMは、QLLsの厚みに関する信頼性の高い定量的データを初めて提示した。そのFM-AFM計測により、厚いQLLsが明確に検出された

ことは、QLLs研究に新たな局面をもたらしたと言える。

一方、このFM-AFMによる発見は、新たな謎も提示している。すなわち、なぜこの厚いQLLsは、光学顕微鏡では観測できなかったのかという点である。この問いに対する有力な仮説として、QLLsが低温で均一な完全濡れに近い膜へと形態変化し光学顕微鏡の検出限界に入ってしまった可能性や、光学分解能以下の微小な液滴として存在していた可能性などが考えられるが、その検証は今後の重要な課題である。

この課題を解く鍵は、図4に示すような両手法の相補的な活用にある。光学顕微鏡は部分濡れの形態、すなわち気液界面のエッジを捉えることには長けているが、均一な完全濡れの層を認識するには、図4aのように極めて微妙な反射率の差を識別する必要があり困難である。一方、AFMはフォースカーブ測定(Zスキャン)によって液膜の存在を検出し、その厚みをナノスケールで定量できる(図3)。しかし、その測定は探針がQLLs内に侵入するため、探針の存在が液体自身の構造や状態に与える変形などの影響がどの程度及ぶかという不確かさが残る。さらに、現状では変形しやすい気液界面を安定して追跡することが困難なため、図4bのようにQLLsの3次元形態観察(XYスキャン)は行えていない。このように、両者の得意・不得意はまさしく鏡像の関係にあり、QLLsの全体像を解明するためには、両者を組み合わせることが不可欠である。

この謎を解き明かすための究極的なアプローチは、AFMとLCM-DIMのような高分解能光学顕微鏡との同時その場観察を実現することである。一般にAFMと組み合わせる光学系は作動距離の長い対物レンズを必要とするため、光学顕微鏡側での高分解能化には技術的な困難が伴う。しかし、この課題を克服し、同一の場所をナノスケールの「力」とミクロンスケールの「光」で同時に捉えることができれば、QLLsの形成メカニズムや物性に関する長年の謎を一挙に解決できる可能性を秘めている。

謝辞

本原稿で紹介した光学顕微法による研究は、北海道大学低温科学研究所の古川義純名誉教授、ならびに麻川明俊博士(現・山口大学)らとの共同研究の成果です。また、本研究における実験装置の作製にあたり、中坪俊一氏(現・JAXA)、斎藤史明氏をはじめとする同研究所技術部の皆様に多大なるご協力を賜りました。ここに記して深く感謝申し上げます。

なお、原子間力顕微鏡による研究は、JSPS科研費(課題

番号16K13615, 24K21716)ならびに北海道大学低温科学研究所の共同研究(2015–2019年度)の支援を受けて行われたものです。

参考文献

- Asakawa, H., Sazaki, G., Nagashima, K., Nakatsubo, S., & Furukawa, Y. (2016). Two types of quasi-liquid layers on ice crystals are formed kinetically. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(7), 1749–1753.
- Bluhm, H., & Salmeron, M. (1999). Growth of nanometer thin ice films from water vapor studied using scanning polarization force microscopy. *The Journal of Chemical Physics*, 111(15), 6947–6954.
- Döppenschmidt, A., & Butt, H. J. (2000). Measuring the thickness of the liquid-like layer on ice surfaces with atomic force microscopy. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 16(16), 6709–6714.
- Faraday, M. (1859). *Experimental researches in chemistry and physics*. Taylor & Francis.
- Furukawa, Y., Yamamoto, M., & Kuroda, T. (1987). Ellipsometric study of the transition layer on the surface of an ice crystal. *Journal of Crystal Growth*, 82(4), 665–677.
- Gelman Constantin, J., Gianetti, M. M., Longinotti, M. P., & Corti, H. R. (2018). The Quasi-Liquid Layer of ice revisited: the role of temperature gradients and tip chemistry in AFM studies. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions: ACPD*, 18, 1–29.
- Inomata, M., Murata, K.-I., Asakawa, H., Nagashima, K., Nakatsubo, S., Furukawa, Y., & Sazaki, G. (2018). Temperature dependence of the growth kinetics of elementary spiral steps on ice basal faces grown from water vapor. *Crystal Growth & Design*, 18(2), 786–793.
- Kouchi, A., Furukawa, Y., & Kuroda, T. (1987). X-RAY DIFFRACTION PATTERN OF QUASI-LIQUID LAYER ON ICE CRYSTAL SURFACE. *Journal de Physique (Paris), Colloque*, 48, 675–677.
- Li, Y., & Somorjai, G. A. (2007). Surface premelting of ice. In *Journal of Physical Chemistry C* (Vol. 111, Issue 27, pp. 9631–9637). <https://doi.org/10.1021/jp071102f>
- Miyato, Y., Otani, K., Maeda, M., Nagashima, K., & Abe, M. (2019). Investigating ice surfaces formed near the freezing point in the vapor phase via atomic force microscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 58(SI), S11A09.

- Murata, K. I., Asakawa, H., Nagashima, K., Furukawa, Y., & Sazaki, G. (2016). Thermodynamic origin of surface melting on ice crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(44), E6741–E6748.
- Murata, K. I., Nagashima, K., & Sazaki, G. (2019). How Do Ice Crystals Grow inside Quasiliquid Layers? *Physical Review Letters*, 122(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.026102>
- Sazaki, G., Zepeda, S., Nakatsubo, S., Yokomine, M., & Furukawa, Y. (2012). Quasi-liquid layers on ice crystal surfaces are made up of two different phases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(4), 1052–1055.
- Sazaki, G., Zepeda, S., Nakatsubo, S., Yokoyama, E., & Furukawa, Y. (2010). Elementary steps at the surface of ice crystals visualized by advanced optical microscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(46), 19702–19707.
- Slater, B., & Michaelides, A. (2019). Surface premelting of water ice. In *Nature Reviews Chemistry* (Vol. 3, Issue 3, pp. 172–188). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41570-019-0080-8>
- 佐崎元, 麻川明俊, 長嶋剣, 中坪俊一, & 古川義純. (2014). 氷ベール面上での形態が異なる2種類の擬似液体層の生成過程. *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 31(3), 100–105.
- 古川義純. (2009). 氷の表面は融けている！：滑りやすさのメカニズム. *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 112(1086), 402–405.
- 村田憲一郎, & 佐崎元. (2017). 氷の表面はなぜ濡れるのか？. *日本物理学会誌*, 72(9), 669–674.