

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246001

研究課題名(和文) 高分解光学観察による氷結晶表面での疑似液体層の動的挙動の解明

研究課題名(英文) Studies on the dynamic behavior of quasi-liquid layers on ice crystal surfaces by advanced optical microscopy

研究代表者

佐崎 元 (SAZAKI, GEN)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：60261509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,200,000円

研究成果の概要(和文)：1) 氷結晶ベーサル面上では、ある臨界水蒸気圧以上の高過飽和下でのみ、液滴状および薄層状の2種類の疑似液体層が生成しうることを見出した。また、2) 氷中の格子欠陥周囲に形成される歪みが、疑似液体層の生成を顕著に誘起することを見出した。さらに、3) 氷結晶のプリズム面および高指数面上においても、ベーサル面と同様の温度領域で、液滴状および薄層状の2種類の疑似液体層が生成することを見出した。以上に加えて、4) 氷ベーサル面上での単位ステップの成長は、水蒸気の体積拡散および表面拡散に律速されることを明らかにするとともに、5) ベーサル面上の渦巻ステップは、2重渦巻構造を持つことを見出した。

研究成果の概要(英文)：We first devised an observation chamber in which temperature of sample ice crystals and supersaturation of water vapor can be controlled separately. Then we obtained the following five findings. 1) Only under supersaturated condition (higher than a critical value), two types of quasi-liquid layer (QLL) phases with drop and thin-layer shapes are formed on ice basal faces. 2) Strain formed around lattice defects in ice crystals significantly induces the formation of the two QLL phases. 3) On prism and other high-index faces, the two QLL phases with the drop and thin-layer shapes are also formed in the temperature ranges similar to those on basal faces. 4) Volume diffusion (in a bulk gas phase) and surface diffusion (on basal faces) of water vapor molecules govern the lateral advancement rate of elementary steps on ice basal faces. 5) On basal faces, spiral steps formed by screw dislocations exhibit a double-spiral structure because of a crystallographic requirement.

研究分野：雪氷の結晶成長

キーワード：氷 表面融解 疑似液体層 単位ステップ 高分解光学顕微法

1. 研究開始当初の背景

表面融解による疑似液体層の発生は、復氷現象や氷の滑りやすさの説明のため、1859年にマイケル・ファラデーが初めて提唱した。それ以降、氷結晶のみならず、鉛などの金属や Si などの半導体をはじめとした様々な結晶材料の表面は、融点近傍の高温下では表面融解し、疑似液体層で覆われることが明らかにされて来た[1]。しかし、金属や半導体の疑似液体層は高温下で発生するため、その直接観察は極めて困難であり、融点近傍での結晶の表面物性を支配する疑似液体層の挙動はまだほとんど明らかになっていなかった。

一方、氷結晶上での疑似液体層の発生については、プロトンチャネリング法、偏光解析法、原子間力顕微鏡法などの手段を用いて、疑似液体層の厚みの温度依存性について多くの測定が行われて来た。しかし、得られた結果は、研究者および測定手段によって極めてばらばらであった。これは、用いられた測定手法が空間分解能に乏しいことによる。また、そのため静的・平衡論的な理解しかこれまでは得られていなかった。

レーザー顕微鏡を用いて、ゼロ℃以下の融点近傍で氷結晶表面上に液滴が発生することを Elbaum らは報告しているが[2]、その後は進展が何ら見られない状況が続いている。

申請者らはこのような状況を打破するべく、高さ方向に極めて高い感度を持つレーザー共焦点微分干渉顕微鏡をさらに極限まで改良することで、空気-氷結晶界面において、単位ステップ (0.37nm 高さ) が成長する様子を直接観察することに初めて成功した [3]。そして、本手法を用いて、過飽和水蒸気から成長する氷結晶表面において、Elbaum らが報告した液滴 (バルク液体状液滴と命名) に加えて、極めて薄い層状の液体層 (薄液状層と命名) が生成することを発見した[4]。この結果は、これまでの静的・平衡論的な理解でははなはだ不十分であり、動的・動力学的な研究が必要不可欠であることを示す。

2. 研究の目的

本研究では、融点近傍で様々な結晶材料表面で観察され、結晶の表面特性を支配する表面融解現象の解明を目指した。氷結晶をモデル材料に選び、結晶表面での2種類の疑似液体層 (バルク液体状液滴と薄液状層) の生成過程および単位ステップの運動を、分子高さ分解能を有するレーザー共焦点微分干渉顕微鏡を用いて直接観察した。さらに、水分子の運動状態を調べるために、同一視野で顕微鏡ラマン分光できる光学系の開発に取り組んだ。具体的には下記の5点に焦点を絞った。

(1) 熱力学的安定性：まず、所定の温度および過飽和度のもとで、氷結晶の表面をレーザー共焦点微分干渉観察するための、「その場観察システム」を構築した。具体的には、濃厚な水蒸気のもとで氷ベール面上での単位ステップの成長速度をその場計測するこ

とで、氷結晶表面の「温度」および水蒸気の「過飽和度」を精密に評価できるシステムを作製した。その副産物として、濃厚な水蒸気中で単位ステップの成長カイネティクスを明らかにすることに初めて成功した。

そして、上記のシステムを用いて、様々な温度および水蒸気圧下で、2種類の疑似液体層の生成・消滅過程を直接観察した。水の圧力-温度相図中のどのような条件下で2種類の疑似液体層が安定に生成しうるかを計測し、疑似液体層の熱力学的安定性を調べた。

(2) 生成カイネティクス：2種類の疑似液体層の核形成・成長過程を様々な条件下でその場観察し、どのような因子が疑似液体層の生成を誘起するのかについて調べた。

(3) 晶癖変化の機構：気相から成長する氷結晶のもう一つの重要なファセット面であるプリズム面、およびプリズム面がサーマルラフニングすることで生成される高指数面上で、疑似液体層の生成を直接観察した。そして、永年の課題である氷結晶の晶癖変化に疑似液体層がどのように関与するかを調べた。

(4) 共存する気相の影響：気固界面では、多量の気体が固相表面に吸着・固溶することが知られている。そのため、 N_2 、 O_2 、 CO_2 などの気体が疑似液体層の生成に及ぼす影響を明らかにしようとした。研究開始後の検討によって、HCl ガスが表面融解に最も大きな影響を及ぼすであろうことがわかったため、HCl ガスについてその影響を調べた。

(5) 分子運動状態：氷結晶表面をレーザー共焦点微分干渉観察しながら、特定の部位をラマン分光するための計測装置を開発した。そして、ラマン分光により2種類の疑似液体層中の水分子の運動状態を調べようとしたが、計測装置の作製に多大な時間を必要としたため、疑似液体層中の水分子の運動状態を計測するにはいたらなかった。

3. 研究の方法

申請者らは近年、空気-氷結晶界面において、0.37nm 高さの単位成長ステップを直接観察することができるレーザー共焦点微分干渉顕微鏡を開発することに成功した [3]。そして、本手法を用いて、氷結晶ベール面上で、液滴状および薄液層状の2種類の疑似液体層が存在することを見出した[4]。本研究においては、様々な温度および過飽和度条件下で、本手法を用いて氷結晶表面を直接観察し、疑似液体層の挙動について調べた。なお、観察システム構築の詳細については、研究成果の(1)①で説明する。

4. 研究成果

(1) 熱力学的安定性

① 氷結晶表面その場観察システムの構築とそれを用いた氷結晶成長カイネティクスの計測：密閉空間内で、表面観察用の氷、および観察用氷に水蒸気を供給するための氷 (体積は観察用氷の 10^4 倍) を調製できる観察用

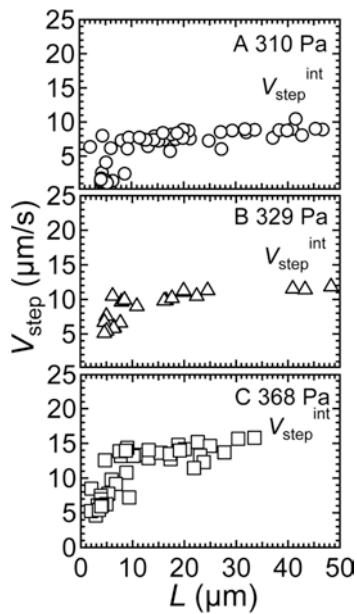


図1 ベーサル面上での単位ステップ前進速度 V_{step} のステップ間隔 L 依存性

チャンバーを作製した。そして、観察用氷の温度と水蒸気供給用氷の温度を独立して制御することで、それぞれ観察温度およびチャンパー内の水蒸気圧を独立に制御した。観察用氷の温度は、観察用氷が融解する温度を直接観察することで精密に校正した。また、水蒸気供給用氷の温度を様々に変化させて、観察用氷結晶の表面の単位ステップを直接観察した。観察用氷の単位ステップが成長も後退もしない時、チャンパー内の水蒸気圧は、所定温度の観察用氷の平衡蒸気圧に等しいとすることで、水蒸気圧を精密に校正した。

このシステムを用いて計測した、氷ベーサル面上での渦巻ステップの成長カイネティクスの一例を図1に示す。縦軸 V は、濃厚気相環境中で初めて計測に成功した渦巻ステップの成長速度を、そして横軸 L は、隣り合った渦巻ステップ同士の間隔をそれぞれ示す。図より、水蒸気圧によらず、 L が $10 \mu\text{m}$ 程度よりも小さくなると、 V が顕著に小さくなるのがわかる。この結果は、ベーサル面上での吸着水分子の表面拡散が、ステップの成長を律速することを示す。本結果より求めた吸着水分子の表面拡散距離は $4.5 \mu\text{m}$ であった。また、詳しくは原著論文3)を参照いただきたいが、本計測より、水蒸気バルク拡散と吸着水分子の表面拡散の両方を考慮に入れたステップの成長速度式を、初めて提案することに成功した。

② 2種類の疑似液体層の熱力学的安定性：次に、①で確立した観察システムを用いて、圧力-温度相図上のどのような条件下で、疑似液体層が生成するかをベーサル面上で計測した。その結果を図2に示す。過飽和度が十分に高い赤色の領域では、成長しているベーサル面上で、層状および液滴状の2種類の疑似液体層が生成した。しかし、過飽和度があ

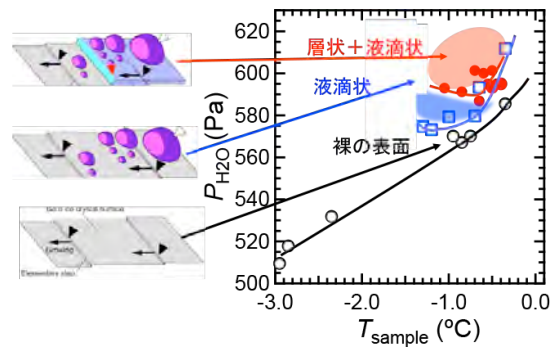


図2 2種類の疑似液体層の熱力学的安定性

る臨界値よりも低くなると（青色領域）、層状の疑似液体層は消滅することがわかった。さらに、過飽和度が減少すると、単位ステップはまだ成長しているにも関わらず、液滴状の疑似液体層も消滅することがわかった。

これまで疑似液体層は、準安定相ではあるが、気相-疑似液体層および疑似液体層-固相の界面エネルギーの利得のため、水蒸気が未飽和・平衡・過飽和のいずれの状態であっても気固界面に安定に存在すると考えられて来た。それに対して、本研究の観察結果は、水蒸気がある臨界過飽和度以上でなければ疑似液体層は存在し得ないことを示す。すなわち、疑似液体相の生成は、従来言われて来た「表面融解」と呼ぶ現象ではなく、過飽和水蒸気の氷表面での「析出」と呼ぶべき現象であることがわかった。この結果は、表面融解に対する従来の描像を根幹から覆す極めて重要な成果である。

(2) 生成カイネティクス：氷ベーサル面の温度を繰り返し上下させて、ベーサル面上での液滴状の疑似液体層の生成および消滅を繰り返しその場観察した。その結果、ベーサル面の端に位置するらせん転位の露頭点からは、液滴状の疑似液体層が常に再現性良く生成することを見出した（図3）。この結果は、らせん転位周辺の「歪み」が液滴状疑似液体層の生成を誘起することを示す。また、ベーサル面の中央部分からは、液定状の疑似液体層がランダムに生成した。これは、ベーサル面

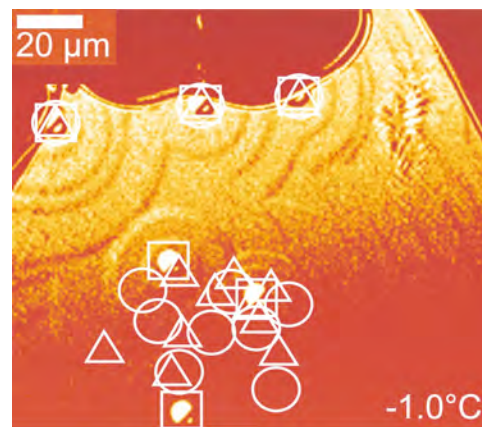


図3 ベーサル面での液滴状疑似液体層の生成。温度を周期的に上下させ、繰り返し生成させた。○:1回目, △:2回目, □:3回目。

中央部分が、ヨウ化銀結晶上にヘテロエピタキシャル成長させたために一様に歪んでいることを強く示唆する。

一方、層状の疑似液体層の場合には、ベーサル面直下に多くのマイクロ欠陥が埋包されている部位より核形成・成長する様子が観察された。この結果も、結晶表面の「歪み」が疑似液体層の生成を誘起したためであると考えられる。さらに、ベーサル面上で液滴状の疑似液体層の直径が数10 μm 以上になると、液滴状疑似液体層・ベーサル面の界面より、層状の疑似液体層が自発的に生成することを見出した。この結果は、層状の疑似液体層が、液滴状の疑似液体層と固相（ベーサル面）の中間の構造を持つことを強く示唆する。

(3) 晶癖変化の機構：氷結晶のもう一つの重要なファセットであるプリズム面は、約 -2°C より高温ではサーマルラフニングし、高指数面が生成することが知られている。ただし、サーマルラフニングは数時間程度の時間スケールでおこる比較的ゆっくりした現象であるため、プリズム面の温度を急速に昇温し、サーマルラフニングを起こしている最中のプリズム面および高指数面を直接観察することで、これらの面上で表面融解がどのようにおこるのかについて調べた。その結果を図4に模式的に示した。図の様に、プリズム面および高指数面上においてもベーサル面と同様に、温度が上昇するとともに、まず液滴状の疑似液体層が生成し、融点直下で層状の疑似液体層が生成することを見出した。氷結晶の「面指数」によらず2種類の疑似液体層が同様に生成するという観察結果は、疑似液体層が2種類存在することが表面融解現象において本質的に重要であることを示す。

気相から成長する氷（雪）結晶の形は、温度の低下とともに、板状($0\sim-4^{\circ}\text{C}$)、柱状($-4\sim-10^{\circ}\text{C}$)、板状($-10\sim-22^{\circ}\text{C}$)、柱状(-22°C 以下)と繰返し変化することが知られている。この晶癖変化はこれまで、当該の温度領域でベーサル面とプリズム面でサーマルラフニングと表面融解が起こるためであると説明されて来た。しかし、図4に示した通り、氷結晶の面指数によらず、表面融解は -1.5°C 以上にならないとおこらず、プリズム面のサーマルラフニングも $-4\sim-2^{\circ}\text{C}$ 以上の温度でしか観察されないことがわかった。そのため、氷の晶癖変化の問題は、振り出しに戻った状況にある。永年信じられて来た概念が誤りであることを明らかにできたのは、重要な成果である。

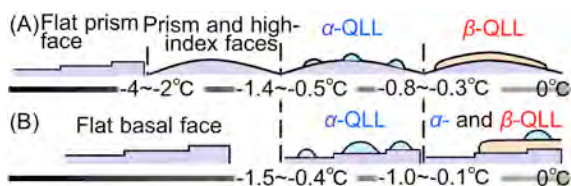


図4 氷結晶上での液滴状(α -)および薄層状(β -)の疑似液体層(QLL)の生成。(A)プリズム面および高指数面、(B)ベーサル面。

今後、各温度領域での氷結晶の「表面構造」を分子レベルで明らかにする研究が行われねばならない。

(4) 共存する気相の影響：研究予算申請の段階では、 N_2 , O_2 , CO_2 などの気体が疑似液体層の生成に及ぼす影響を明らかにすることを予定していた。しかし、その後の検討によって、 HCl ガスが最も大きな影響を及ぼすであろうことがわかったため、 HCl ガスが表面融解に及ぼす影響について調べた。

その結果、 N_2 ガス中では決して表面融解が起こらない温度(-15°C)においても、チャンバー内に5% HCl ガス(N_2 で希釈)を導入すると、ある待ち時間後に、急速にベーサル面が表面融解することを初めて明らかにすることに成功した(図5)。ベーサル面に吸着した HCl ガスが表面融解を誘起しようとし、生成する液滴の大きさが臨界核サイズを超えるや否や、液滴の生成が急速に進行したものと考えられる。本結果は、我々が知る限り、結晶表面上で進行する「化学反応」を可視化することに初めて成功したものである。また、氷表面上での HCl ガスの吸着とそれに伴う氷の表面融解は、北極・南極上空においてオゾンが分解されてオゾンホールが生成する一連の化学反応の一部であり、地球環境問題の観点からも極めて興味深い。今後も重要なテーマとして研究を継続してゆきたい。

(5) 分子運動状態：氷結晶表面をレーザー共焦点微分干渉観察しながら、特定の部位をラマン分光するための光学系を作製し、立ち上げた。所望する波長分解能に応じた3種類のグレーティングを装備したツェルニターナ型光学系を作製した。また、氷結晶表面上に生成する薄い疑似液体層中の水の分子運動を高感度に捉えるため、ライン型の冷却EM-CCDを検出系に用いた。現有のレーザー共焦点顕微光学系に高効率で接続すること、および光学系の各所から発生するラマン散乱を完全に除去することに多大な時間を要した。そのため、バルクの水および氷結晶からのラマンシグナルを良好に捕まえることには成功したが、当初予定していた氷結晶表面の疑似液体層をラマン分光するまでにはいたらなかった。疑似液体層のラマン分光計測は、今後の研究課題としたい。どのくら

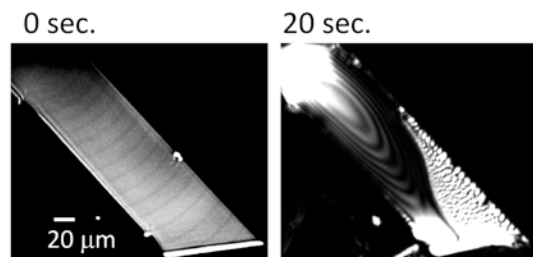


図5 氷ベーサル面の表面融解に及ぼす HCl ガスの効果。 -15°C で成長しているベーサル面に HCl ガスを接触させると、20秒後に急に表面融解が進行し、液滴が多数生成した。

いの薄さまでであれば疑似液体層からラマンシグナルを得ることができるか、および疑似液体層の背後に存在する氷結晶からのラマン散乱の影響をどのようにして除去できるか、の2点が重要な検討課題となる。

(6) 氷ベーサル面上の渦巻ステップの構造 :

(1) ①において計測した単位ステップの成長カイネティクスをモデル化するにあたり、氷ベーサル面上の渦巻ステップがどのような構造をしているかを明らかにする必要があった。そこで、当初の研究項目に加えて、ベーサル面上の渦巻ステップの構造を明らかにするための下記の研究を新たに行った。

ベーサル面上の2次元島のステップの高さはバイレイヤー1層分(0.37 nm)であることがこれまでにわかっている[3]。そこでまず、ベーサル面上で、2次元島ステップと渦巻ステップが衝突・合体する様子をその場観察した。その結果、渦巻ステップも2次元島ステップと同じバイレイヤー1層分(0.37 nm)の高さであることがわかった。

しかし、ベーサル面では結晶学的要請により、らせん転位のバーガース・ベクトルはバイレイヤー2層分である必要がある。そのため、ベーサル面上の渦巻ステップは、図6に示す「2重渦巻構造」を持つと考えられる。すなわち、らせん転位の中心部分では、バイレイヤー1層高さのステップAとBは互いに重なり合っているが、横方向に成長するとともに互いに離れて2重の渦巻構造を示す。現有の観察装置で実現できる最も低温(-15°C)での観察実験より、渦巻ステップが確かに2重構造(図6)を有することを実験的に証明することが出来た。

(7) まとめ:本研究では、上記に示した6つの検討を行い、疑似液体層および氷結晶について重要な成果を得ることができた。しかし、疑似液体層についての研究はまだ始まったばかりである。「なぜ2種類の疑似液体層が生成せねばならないのか」という最も根源的な疑問はまだ解決できていない。この点を明らかにするために、2種類の疑似液体層の構造や物性を直接計測する研究を、今後さらに強力に展開する予定である。

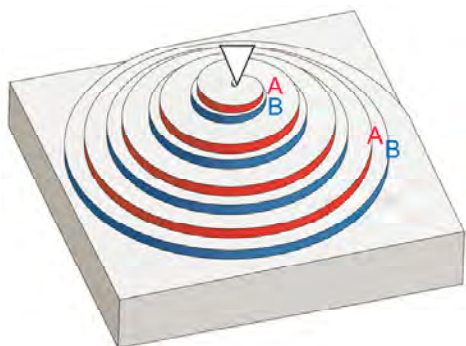


図6 氷ベーサル面上の渦巻ステップの模式図. AおよびBは互いになりあう2つのバイレイヤーを示す。

引用文献

- [1] van der Veen JF, Pluis B, & Denier van der Gon AW (1988) Surface melting. *Chemistry and physics of solid surfaces VII*, eds. Vanselow R & Howe RF (Springer-Verlag, Berlin), pp 455-490.
 [2] M. Elbaum, S.G. Lipson, J.G. Dash, *J. Crystal Growth*, **129**, 491-505 (1993).
 [3] G. Sazaki, S. Zepeda, S. Nakatsubo, E. Yokoyama, Y. Furukawa, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, **107**, 19702-19707 (2010).
 [4] G. Sazaki, S. Zepeda, S. Nakatsubo, M. Yokomine, Y. Furukawa, "Quasi-liquid layers on ice crystal surfaces are made up of two different phases", *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, **109**, 1052-1055 (2012).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件: 全て査読有り)

- ほか、1報投稿中、2報投稿準備中
 1) 佐崎 元, 麻川明俊, 長嶋 剣, 中坪俊一, 古川義純, "氷ベーサル面上での形態が異なる2種類の疑似液体層の生成過程", *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, **31**, 100-105 (2014).
 2) D. A. Vorontsov, G. Sazaki, S. H. Hyon, K. Matsumura, Y. Furukawa, "Antifreeze effect of carboxylated e-poly-L-lysine on the growth kinetics of ice crystals", *J. Phys. Chem. B*, **118**, 10240-10249 (2014).
 3) H. Asakawa, G. Sazaki, E. Yokoyama, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "Roles of surface/volume diffusion in the growth kinetics of elementary spiral steps on ice basal faces grown from water vapor", *Crystal Growth & Design*, **14**, 3210-3220 (2014).
 4) G. Sazaki, H. Asakawa, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "Double spiral steps on Ih ice crystal surfaces grown from water vapor just below the melting point", *Crystal Growth & Design*, **14**, 2133-2137 (2014).
 5) 佐崎 元, サルバドール ゼペダ, 中坪俊一, 古川義純, "氷結晶表面での単位ステップと疑似液体層の直接光学観察", *低温科学*, **71**, 1-13 (2013).
 6) 佐崎 元, サルバドール ゼペダ, 中坪俊一, 古川義純, "氷結晶の表面融解過程の光学その場観察", *応用物理*, **82**, 150-153 (2013).
 7) Y. Suzuki, G. Sazaki, K. Hashimoto, T. Fujiwara, Y. Furukawa, "Colloidal crystallization utilizing interfaces of unidirectionally growing crystals", *J. Crystal Growth*, **383**, 67-71 (2013).
 8) G. Sazaki, H. Asakawa, K. Nagashima, S.

Nakatsubo, Y. Furukawa, "How do quasi-liquid layers emerge from ice crystal surfaces?", *Crystal Growth & Design*, **13**, 1761-1766 (2013).

9) 佐崎 元, サルバドール ゼペダ, 中坪俊一, 古川義純, "レーザー共焦点微分干渉顕微鏡を用いた氷結晶表面での分子ステップのその場観察", *光学*, **41**, 33-35 (2012).

[学会発表] (計 49 件: 招待講演 20 件, 一般講演 29 件) 以下に主なものを示す.

1) G. Sazaki, H. Asakawa, K. Murata, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "In situ observation of surface melting processes of ice crystals by advanced optical microscopy", International Symposium on Semiconductor Materials and Devices, Crystal Growth Centre, Anna University, Chennai, India, February 2-5, 2015. 【招待講演】

2) 佐崎 元, 麻川明俊, 長嶋 剣, 中坪俊一, 古川義純, 「氷結晶表面の擬似液体層の生成機構と熱力学的安定性」, 領域 9, 11 合同シンポジウム「氷の結晶成長-実験とシミュレーションによる最近の進展」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27-30 日, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市). 【招待講演】

3) H. Asakawa, G. Sazaki, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "Thermodynamic stabilities of two types of quasi-liquid layer phases on ice basal faces", 13th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (PCI-2014), Hanover, USA, March 17-20, 2014. 【招待講演】

4) G. Sazaki, H. Asakawa, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "How do quasi-liquid layers emerge from ice crystal surfaces?", 13th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (PCI-2014), Hanover, USA, March 17-20, 2014. 【招待講演】

5) 佐崎 元, 麻川明俊, 長嶋 剣, 中坪俊一, 古川義純, 「氷結晶の表面融解過程の高分解光学観察」, 日本化学会有機結晶部会第 22 回有機結晶シンポジウム, 2013 年 10 月 30 日~11 月 1 日, 北海道大学札幌キャンパス (北海道札幌市). 【招待講演】

6) 佐崎 元, 麻川明俊, 長嶋 剣, 中坪俊一, 古川義純, 「高分解光学顕微技術で見る氷結晶の表面融解現象」, 第 9 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 2013 年 10 月 29 日, JAXA 調布航空宇宙センター (東京都調布市). 【招待講演】

7) G. Sazaki, H. Asakawa, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "Thermodynamic stabilities of quasi-liquid layers on ice basal faces", 2nd Fusion Materials Special Meeting, アルカディア市ヶ谷私学会館 (東京都千代田区), Japan, October

27-28, 2013. 【招待講演】

8) 佐崎 元, 麻川明俊, 長嶋 剣, 中坪俊一, 古川義純, 「氷結晶表面の光学その場観察: 表面融解による擬似液体層の生成」, 第 40 回食品の物性に関するシンポジウム, 2013 年 9 月 20-21 日, ルポール讃岐 (香川県高松市). 【招待講演】

9) G. Sazaki, H. Asakawa, K. Nagashima, S. Nakatsubo, Y. Furukawa, "In-situ observation of emergences of quasi-liquid layers from ice basal faces by advanced optical microscopy", The 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Warsaw, Poland, August 11-16, 2013. 【招待講演】

[図書] (計 1 件)

1) Y. Furukawa, G. Sazaki, H. Nada, "Chapter 17 Surface of Ice", K. Wandelt (Ed.), *Surface and Interface Science*, pp. 305-348 (WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2014).

[産業財産権]

出願・取得 (ともに 0 件)

[その他]

<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/ptdice/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐崎 元 (SAZAKI GEN)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号: 60261509

(2) 研究分担者

古川 義純 (FURUKAWA YOSHINORI)

北海道大学・低温科学研究所・特任教授

研究者番号: 20113623

長嶋 剣 (NAGASHIMA KEN)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号: 60436079

村田 憲一郎 (MURATA KEN-ICHIRO)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号: 60646272

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

麻川 明俊 (ASAKAWA HARUTOSHI)

北海道大学・低温科学研究所・博士研究員

清田 達央 (KIYOTA TATSUO)

北海道大学・大学院理学研究科宇宙理学

専攻・修士学生

猪股 将弘 (INOMATA MASAHIRO)

北海道大学・大学院理学研究科宇宙理学

専攻・修士学生