

令和 2 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05604

研究課題名(和文) 地球環境での氷表面疑似液体層の役割：雰囲気ガスと水蒸気量を制御したその場観察実験

研究課題名(英文) Quasi-liquid layer on ice surfaces in the global environment: In-situ observation by controlling atmospheric gas and water vapor pressure

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：氷表面は大気中のガスの化学反応場として注目される一方で、融点付近の氷表面は疑似液体層(QLL)で覆われることでも知られている。本研究では、高分解能光学顕微鏡によって酸性ガス(HNO<sub>3</sub>とHCl)が氷表面やQLLに及ぼす影響を直接観察した。その結果、酸性ガスの存在下での疑似液体層は純粋な水ではなく酸性溶液であることがわかった。また、HNO<sub>3</sub>-QLLは氷-液滴界面から氷が均一に成長したのに対し、HCl-QLLは氷-液滴-気相界面から氷が成長してQLL表面を覆い、最終的には氷内部に埋没した。埋没が起こると多量の酸性成分が速やかに氷内部へと取り込まれるため重要なプロセスであることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷表面における酸性ガスの反応は、オゾン層の破壊や二酸化窒素ガス等の有毒ガス生成を促進すると言われている。氷表面を覆うnmオーダー厚みの疑似液体層はこういった反応に関与すると考えられているが不明点が多い。研究代表者は高分解能光学顕微鏡で疑似液体層を直接観察することによって、地球大気に含まれるようなわずかなppbオーダーの酸性ガスであっても氷表面の疑似液体層の安定性を高め、存在温度や存在形態を変化させることを発見した。

研究成果の概要(英文)：Surfaces of ice have attracted considerable attention as “reaction sites” where atmospheric gases cause various chemical reactions. In addition, the ice crystal surfaces near melting point are covered with quasi-liquid layers (QLLs). We directly visualized effects of acidic gases (HNO<sub>3</sub> and HCl) on ice surfaces by advanced optical microscopy. In the presence of acidic gas, QLLs were not pure bulk water but acidic solution. In the case of the HNO<sub>3</sub> droplets, the ice-droplet interface grows evenly by vapor-liquid-solid growth mechanism. In contrast, in the case of HCl droplets, the growth of ice starts from the ice-droplet-vapor interface (contact lines) and the subsequent growth proceeded on the surface of the droplets, resulting in the embedding of the droplets in the ice crystals.

研究分野：結晶成長

キーワード：氷 疑似液体層 大気化学 酸性ガス 不均一反応

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 本研究課題の申請時における背景

氷表面は融点(0℃)以下であっても疑似液体層によって濡れており、雪の成長や雷の発生など様々な影響を与えていると言われていた。ところが、現実の大気組成や温度・水蒸気量における疑似液体層の存在条件はほとんど分かっていなかった。

#### (2) 本研究課題の申請に関する動機

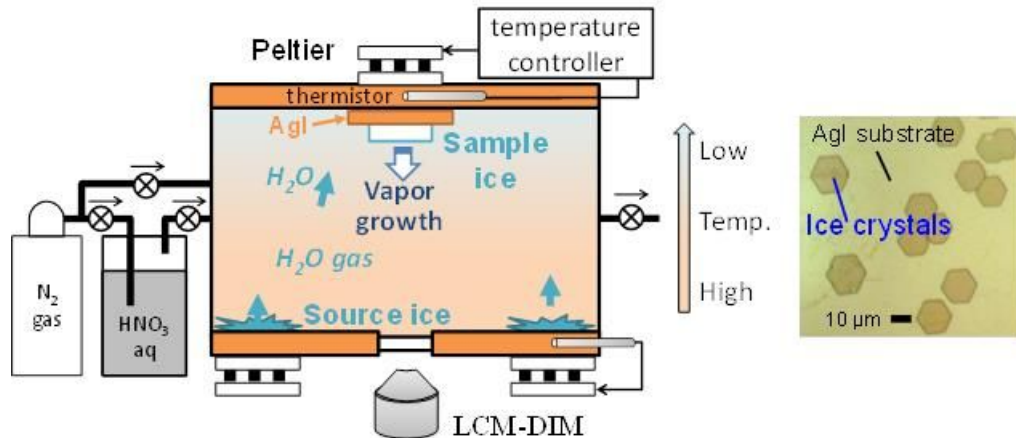
2012年にレーザー共焦点微分干渉顕微鏡という高分解能光学顕微鏡で、疑似液体層を直接観察できることがわかった。その後、研究代表者は高分解能光学顕微鏡を用いることで、微量な酸性ガス成分(塩化水素ガス)が疑似液体層の出現を促進することに気づいた[1]。よって、酸性ガス成分が疑似液体層に与える効果を定量的に調べない限りは地球環境での疑似液体層の影響を正しく見積もれないと考えた。

### 2. 研究の目的

様々な地球環境における氷表面の疑似液体層の存在条件を高分解能光学顕微鏡観察によって実験的に明らかにする。特に、雰囲気ガス組成・温度・水蒸気量という3つの条件に着目する。

### 3. 研究の方法

観察チャンバー内で氷単結晶を育成し、高さ1nm以下の分解能を有するレーザー共焦点微分干渉顕微鏡によって氷ベール面をその場観察した。雰囲気ガスは窒素のみ、窒素+塩化水素ガス、窒素+硝酸ガスという3条件を中心に、温度(0~-30℃)・湿度(0~300%)を変化させながら疑似液体層の出現・消失条件等を調べた。



### 4. 研究成果

#### (1) はじめに

氷表面は酸性ガスの不均一反応場(氷に吸着したガス分子が起こす反応)として機能することが知られている。例えば塩化水素ガスによるオゾン層破壊や、硝酸ガスの光分解による窒素酸化物ガス(NOx)の生成といった化学反応は、均一反応(大気中のガス分子同士の反応)だけでは説明ができない。加えて、融点近傍の氷表面は疑似液体層と呼ばれる薄い水膜で覆われている。疑似液体層は大気の不均一反応においても重要な役割を果たす可能性があるが、nm厚みの疑似液体層は検出するだけでも難しくほとんど研究が進んでいない。本研究では、高さ分解能に優れたレーザー共焦点微分干渉顕微鏡という高分解能光学顕微鏡を用いることで氷ベール面の疑似液体層を直接観察し、酸性ガス(塩化水素ガス、硝酸ガス)の影響を調べた。

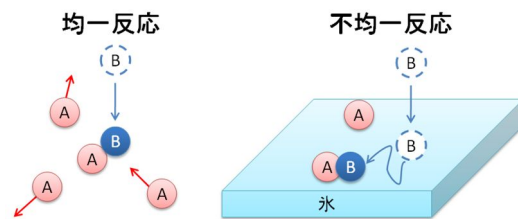


図1. 均一反応と不均一反応

#### (2) 疑似液体層の出現

いずれの条件でも、疑似液体層は温度の上昇に伴い出現した。また、酸性ガスの有無、分圧によらず出現温度は-1~-2℃程度とほとんど同じであった[2]。酸性ガス分圧が高くなると若干出現温度が下がる傾向が認められたが、地球大気程度の分圧( $< 10^{-4}$  Pa)ではほとんど変化が無かった。ただし、HCl分圧5000 Paと非常に高い場合は-15℃でも疑似液体層の出現が確認されている[1]。

一方、疑似液体層の出現の仕方は酸性ガスの有無で異なった[2]。酸性ガスが無い場合は孤立した 10  $\mu\text{m}$  程度の疑似液体層が多数出現した。酸性ガスがある場合は氷結晶周辺からドーナツ状に疑似液体層が出現した後に变形し、最終的には結晶表面の中心に 1 つの大きな疑似液体層となった。反射型二光束干渉計で疑似液体層の形状を調べたところ、酸性ガスの有無に関わらずいずれの場合も球形ドーム状で接触角は数度未満であった[2]。

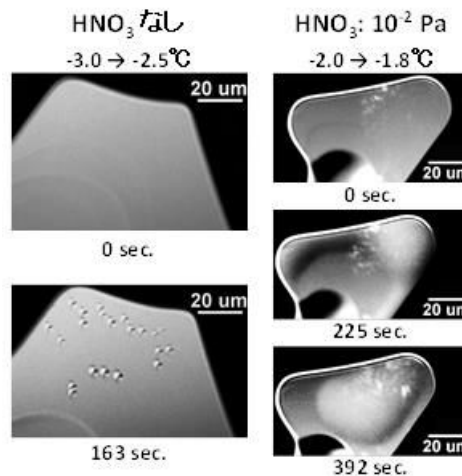


図 2. 疑似液体層の出現[2]

### (3) 疑似液体層の消失

いずれの条件でも、出現した疑似液体は温度低下に伴い消失した。酸性ガスが無い場合の消失温度は出現温度と同程度でヒステリシスはほとんど存在しなかった[2]。しかし、酸性ガスがある場合は酸性ガス分圧が増すにつれ消失温度は低下し出現温度とのヒステリシスが大きくなった。例えば、硝酸ガス分圧が  $10^{-4}$  Pa、 $10^{-2}$  Pa の場合の疑似液体層の消失温度はそれぞれ -1、-6 であった[2]。これらの硝酸ガス分圧はおおよそ地球大気における硝酸ガスが少ない場合と多い場合とに対応する。より高い酸性ガス分圧になると -30 まで下げても疑似液体層の消失は確認できなくなった[1]。

### (4) 酸性溶液となる疑似液体層

酸性ガスがあると異なる現象が見られる原因として、酸性ガスが疑似液体層に溶け込み酸性溶液となっていることがわかった[1-3]。温度、水蒸気分圧、酸性ガス分圧に応じ、疑似液体層 - 氷界面では氷の融解や疑似液体層の凝固、疑似液体層 - 気相界面では疑似液体層からの  $\text{H}_2\text{O}$ ・酸性ガス成分の蒸発や凝縮といった反応が起こる。ただし、実際には固液反応である前者の方が、気液反応である後者よりも速いため、疑似液体層 - 氷界面では平衡に近い状態が保たれていることがわかった。そのため疑似液体層（酸性溶液）は氷表面に安定に存在することができることとなる。

### (5) 温度低下による疑似液体層のサイズ縮小

酸性ガス下での疑似液体層は、温度低下により縮小することがわかった[2]。酸性ガスが無い時にこの現象は確認されないため、酸性ガスが何らかの関与をしているはずである。酸性ガス存在下で温度が低下すると、疑似液体層（酸性溶液）は過冷却状態となるため疑似液体層 - 氷界面では氷が成長することとなる。氷が成長すると酸性溶液の濃度が上昇し、新たな温度での平衡濃度となった時に氷の成長は止まる。この過程で疑似液体層のサイズは小さくなるはずである（図 3）。疑似液体層と氷の結晶が平衡状態にあるならば、 $\text{HNO}_3$ - $\text{H}_2\text{O}$  相平衡図（図 3）より温度の関数として硝酸濃度が決定され、結果として体積がどの程度変化するかを計算することができる。この計算結果を実験結果とを比較すると、よい一致が見られたことから（図 4 赤破線）疑似液体層 - 氷界面では平衡が成り立っていること、温度から疑似液体層の酸性溶液濃度が求められることなどがわかった[2]。

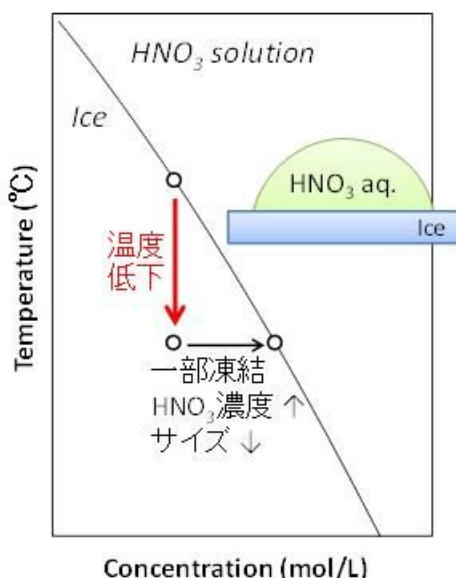


図 3. 疑似液体層のサイズ変化メカニズム。実線は硝酸溶液の凝固温度[2]。

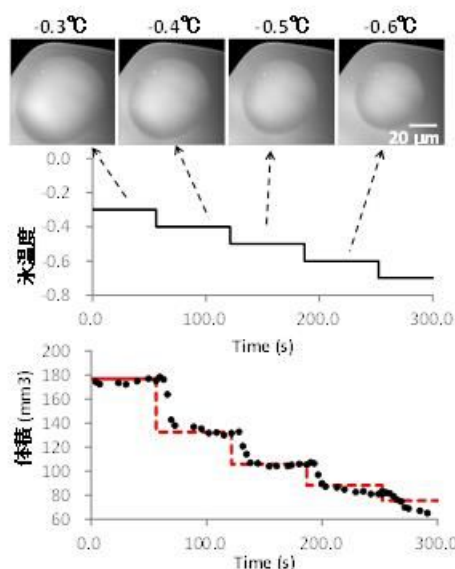


図 4. 疑似液体層のサイズ変化の観察。赤破線は図 3 の凝固温度から計算した理論的な体積変化[2]。



(6) 疑似液体層の消失メカニズム

(5)のメカニズムにより温度低下に伴って酸性ガス下での疑似液体層は小さくなるが、このメカニズムが適用できるのは融点近傍の高温状態のみで、低温になると理論計算結果より早く疑似液体層は縮小し消失することがわかった[2]。これは疑似液体層から酸性成分が蒸発することを考慮に入れることで説明ができる。ここでは硝酸ガス下での疑似液体層について検討した結果を示す。

温度低下に伴い疑似液体層（硝酸溶液）の硝酸濃度は増加する。硝酸溶液の  $\text{HNO}_3$  成分の平衡蒸気圧  $P_{e(\text{HNO}_3)}$  は温度が下がると低くなるが、硝酸濃度が上昇すると高くなるためどのような温度傾向を示すかは自明ではない。 $P_{e(\text{HNO}_3)}$  の計算結果は図5のようになっており、実験温度範囲では温度低下に伴う硝酸濃度の上昇の寄与が大きいので  $P_{e(\text{HNO}_3)}$  は上昇する。すなわち、温度が低下してチャンパー内の  $P_{\text{HNO}_3}$  を超えたために、 $\text{HNO}_3$  成分が疑似液体層から蒸発し疑似液体層が消失したと考えられる。

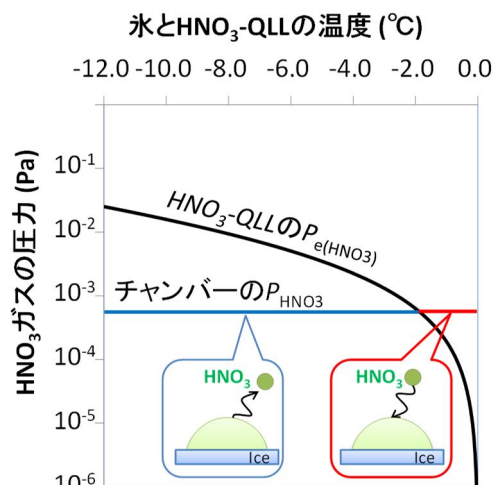


図5. 疑似液体層（硝酸溶液）の  $\text{HNO}_3$  成分に関する平衡蒸気圧  $P_{e(\text{HNO}_3)}$  [2]。

(7) 硝酸ガスと塩化水素ガスとの違い

酸性ガス下での疑似液体層 - 氷界面では、温度低下や過飽和水蒸気によって界面での氷の成長が起こる。その氷の成長が起こる場所について硝酸ガス下と塩化水素ガス下では違いのあることがわかった。硝酸ガスの場合は図6左のように疑似液体層 - 氷界面が平均的に融液成長する。その結果、生じた段差は気相成長によって横に広がりマクロステップとして観察される（赤矢印）。ところが塩化水素ガスの場合、疑似液体層 - 氷界面が優先的に融液成長し、疑似液体層表面が氷で覆われてしまう。その後、疑似液体層表面を覆った氷が気相成長することで疑似液体層は氷内部に埋没してしまう（図6右）。約1時間後に湿度100%以下にして氷を蒸発させると埋没した疑似液体層（塩酸液滴）は氷内部から全く同じ場所・同じサイズで再出現した。これは塩酸液滴と氷が平衡状態にあるため氷内部でも凝固することなく存在し続けたからと考えられる。

塩酸溶液の疑似液体層が氷に埋没し硝酸ガスでは埋没が見られなかったことが、本質的な溶液の性質の違いに起因しているのか、温度や水蒸気量、酸性ガス分圧によっては硝酸ガスでも埋没が起こりえるのかはまだ調べ切れていない。塩酸溶液が埋没する場合、塩化水素成分が氷内部へと速やかに取り込まれることになり、その量は塩化水素ガスの氷に対する溶解度の10倍に達することがわかった[3]。よって、埋没が起こる条件の確定は今後の重要課題として実験計画中である。

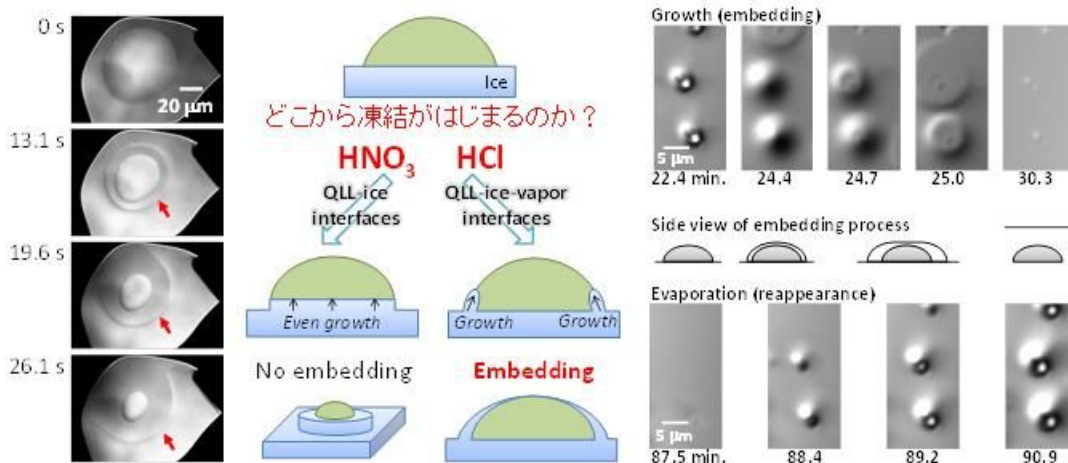


図6. (左) 硝酸ガス下で疑似液体層の一部が凍った時の様子。(中央) 疑似液体層の凍結メカニズム。(右) 塩化水素ガス下で疑似液体層の一部が凍った時の様子。下段は疑似液体層埋没後に氷を蒸発させた時の様子。

参考文献

[1] Nagashima et al. (2016) Cryst. Growth Des. 16, 2225.  
 [2] Nagashima et al. (2020) Crystals 10, 72.  
 [3] Nagashima et al. (2018) Cryst. Growth Des. 18, 4117.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Furukawa Yoshinori, Nagashima Ken, Nakatsubo Shunichi, Zepeda Salvador, Murata Ken-ichiro, Sazaki Gen	4. 巻 377
2. 論文標題 Crystal-plane-dependent effects of antifreeze glycoprotein impurity for ice growth dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20180393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2018.0393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Miyato Yuji, Otani Katsuki, Maeda Motoyasu, Nagashima Ken, Abe Masayuki	4. 巻 58
2. 論文標題 Investigating ice surfaces formed near the freezing point in the vapor phase via atomic force microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11A09
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab203d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagashima Ken, Maurais Jos?e, Murata Ken-ichiro, Furukawa Yoshinori, Ayotte Patrick, Sazaki Gen	4. 巻 10
2. 論文標題 Appearance and Disappearance of Quasi-Liquid Layers on Ice Crystals in the Presence of Nitric Acid Gas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 72 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst10020072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nagashima K, Sazaki G, Hama T, Murata K, Furukawa Y	4. 巻 18(7)
2. 論文標題 Uptake Mechanism of Atmospheric Hydrogen Chloride Gas in Ice Crystals via Hydrochloric Acid Droplets.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 4117-4122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.8b00531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bayer-Giraldi M, Sazaki G, Nagashima K, Kipfstuhl S, Vorontsov D.A, Furukawa Y	4. 巻 115(29)
2. 論文標題 Growth suppression of ice crystal basal face in the presence of a moderate ice-binding protein does not confer hyperactivity.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. Nat. Acad. Sci. USA.	6. 最初と最後の頁 7479-7484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.1807461115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murata K, Nagashima K, Sazaki G	4. 巻 2(9)
2. 論文標題 In-situ observation of spiral growth on ice crystal surfaces.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Matt.	6. 最初と最後の頁 093402-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.026102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kaneko F, Katagiri C, Sazaki G, Nagashima K	4. 巻 122(51)
2. 論文標題 ATR FTIR spectroscopic study on insect body surface lipids rich in methylene-interrupted diene.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Chem. B	6. 最初と最後の頁 12322-12330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b10026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chen J, Nagashima K, Murata K, Sazaki G	4. 巻 19(1)
2. 論文標題 Quasi-liquid layers can exist on polycrystalline ice thin films at a temperature significantly lower than on ice single crystals.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 116-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.8b01091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murata K, Nagashima K, Sazaki G	4. 巻 122
2. 論文標題 How Do Ice Crystals Grow inside Quasiliquid Layers?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 26102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.093402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 金子文俊, 片桐千仞, 長嶋剣, 佐崎元	4. 巻 54(3)
2. 論文標題 昆虫の体表脂質構造への赤外分光法によるアプローチ: 透湿性との関わり	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 昆虫と自然2019年3月号	6. 最初と最後の頁 30-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 麻川明俊, 佐崎元, 長嶋剣, 中坪俊一, 古川義純	4. 巻 26(2)
2. 論文標題 高分解能光学顕微鏡を駆使して氷の表面融解の本質に迫る	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Soc. Inorg. Mat. Jpn.	6. 最初と最後の頁 99-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furukawa Yoshinori, Nagashima Ken, Nakatsubo Shun-ichi, Yoshizaki Izumi, Tamaru Haruka, Shimaoka Taro, Sone Takehiko, Yokoyama Etsuro, Zepeda Salvador, Terasawa Takanori, Asakawa Harutoshi, Murata Ken-ichiro, Sazaki Gen	4. 巻 7
2. 論文標題 Oscillations and accelerations of ice crystal growth rates in microgravity in presence of antifreeze glycoprotein impurity in supercooled water	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 43157 ~ 43157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep43157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Inomata Masahiro, Murata Ken-ichiro, Asakawa Harutoshi, Nagashima Ken, Nakatsubo Shunichi, Furukawa Yoshinori, Sazaki Gen	4. 巻 18
2. 論文標題 Temperature Dependence of the Growth Kinetics of Elementary Spiral Steps on Ice Basal Faces Grown from Water Vapor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 786 ~ 793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.7b01251	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 佐崎 元, 麻川明俊, 村田憲一郎, 長嶋 剣, 中坪俊一, 古川義純
2. 発表標題 高分解光学顕微鏡で見る氷の表面融解: 2種類の擬似液体層とその生成機構
3. 学会等名 日本ゴム協会第117回トライボロジー研究分科会, 東京都 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashima, G. Sazaki, T. Hama, K. murata, Y. Furukawa
2. 発表標題 Effects of acidic gasses on ice surfaces grown from water vapor
3. 学会等名 The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Keystone, Colorado, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Chen, K. Nagashima, K. Murata, G. Sazaki
2. 発表標題 Quasi-liquid layers can exist on polycrystalline ice thin films at a temperature significantly lower than on ice single crystals
3. 学会等名 The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy, Keystone, Colorado, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 G. Sazaki , M. Inomata , K. Murata , K. Nagashima , J. Chen , Y. Furukawa
2. 発表標題 In-situ optical microscopic observation of ice crystal surfaces
3. 学会等名 The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy , Keystone , Colorado , USA ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐崎 元 , 村田憲一郎 , 長嶋 剣 , 古川義純
2. 発表標題 ゼロ°C以下の温度でも融けている氷表面の不思議
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会 , 第80回記念シンポジウム「北緯43°からの独創研究発信」, 北海道 ( 招待講演 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G. Sazaki , K. Murata , K. Nagashima , Y. Furukawa
2. 発表標題 Surface melting of ice crystals visualized by advanced optical microscopy
3. 学会等名 The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCChE 2019) , Sapporo , Japan ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jialu Chen , Ken-ichiro Murata , Ken Nagashima , Gen Sazaki
2. 発表標題 Behavior of QLLs on grain boundaries of polycrystalline ice thin films
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議 , 大阪府
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長嶋 剣, 佐崎 元, 羽馬哲也, 村田憲一郎, 古川義純
2. 発表標題 酸性溶液として氷に蓄えられる酸性ガス
3. 学会等名 第48回結晶成長国内会議, 大阪府
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長嶋 剣, 佐崎 元, 村田 憲一郎, 古川 義純, 羽馬 哲也
2. 発表標題 高分解能光学顕微鏡による氷表面の分子ステップと疑似液体層観察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長嶋 剣, 佐崎 元, 村田 憲一郎, 古川 義純
2. 発表標題 高分解能光学顕微鏡による分子レベルでの氷表面の理解
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長嶋 剣, 佐崎 元, 羽馬 哲也, 村田 憲一郎, 古川 義純
2. 発表標題 表面液体層を経由した氷内への塩化水素ガス取り込みメカニズム
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長嶋 剣、佐崎 元、羽馬 哲也、村田 憲一郎、古川 義純
2. 発表標題 気相成長する氷表面に与える酸性ガスの影響
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長嶋 剣、佐崎 元、羽馬 哲也、村田 憲一郎、古川 義純
2. 発表標題 高分解能光学顕微鏡によって可視化された氷の表面融解現象
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長嶋 剣、佐崎 元、羽馬 哲也、村田 憲一郎、古川 義純
2. 発表標題 塩化水素ガスによって氷表面に生じる液体層のその場観察
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長嶋 剣、佐崎 元、羽馬 哲也、村田 憲一郎、古川 義純
2. 発表標題 気相成長によって氷内部に埋め込まれた塩酸液滴包有物
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長嶋 剣、佐崎 元、羽馬 哲也、村田 憲一郎、古川 義純
2. 発表標題 気相成長によって表面液体層経由で氷内部に取り込まれる塩化水素ガス
3. 学会等名 第46回結晶成長国内会議
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 NAGASHIMA Ken, SAZAKI Gen, HAMA Tetsuya, MURATA Ken-ichiro, FURUKAWA Yoshinori
2. 発表標題 Hydrochloric acid droplets on ice crystal surfaces embedded in ice by vapor growth
3. 学会等名 14th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考